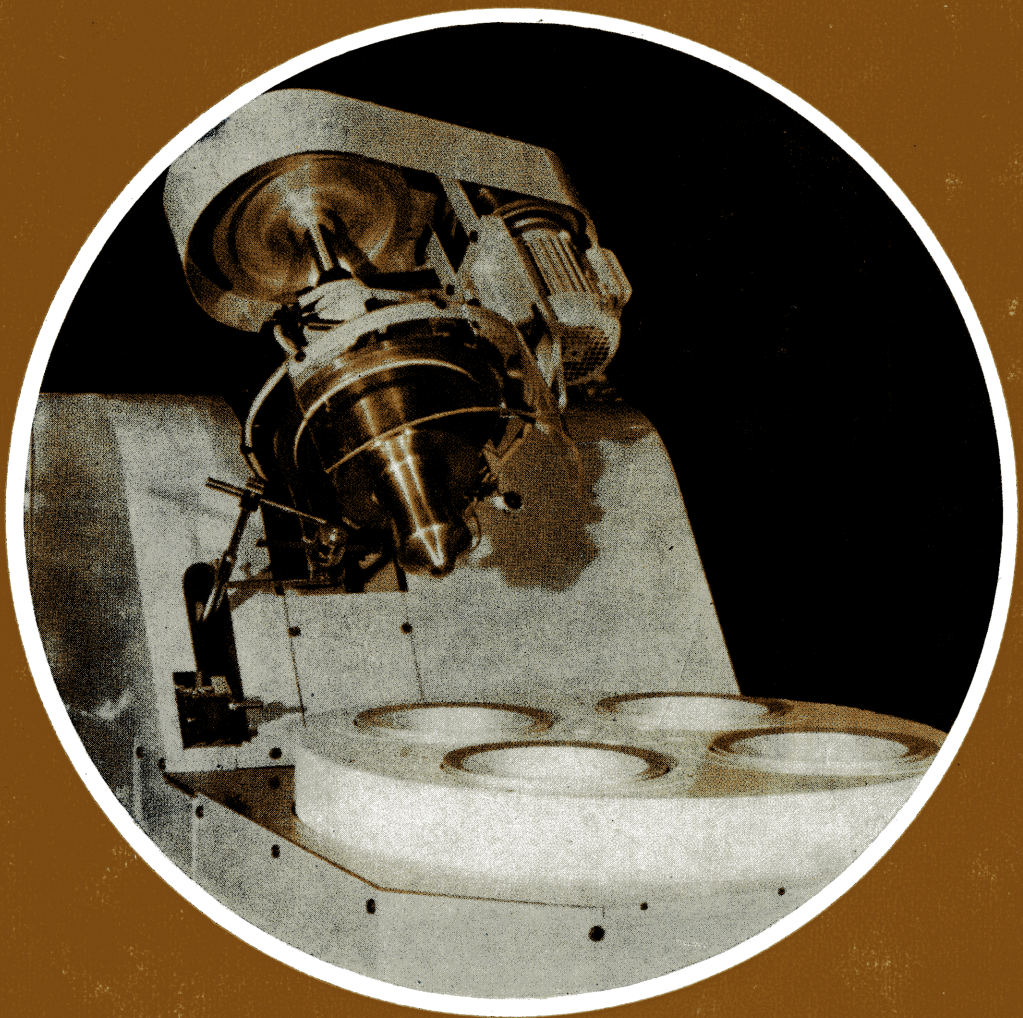
Hülsenberg · Krüger · Steiner

Keramikformgebung

Grundlagen · Verfahren · Maschinen



0120213

Keramikformgebung

VEB DEUTSCHER VERLAG FÜR GRUNDSTOFFINDUSTRIE · LEIPZIG

ISBN 3-342-00098-8

Gegenwärtig entwickelt sich die Keramik, insbesondere die Konstruktions- und Funktionskeramik, international sprunghaft. Um die hohen qualitativen und quantitativen Steigerungsraten realisieren zu können, ist eine durchgängige Automatisierung des gesamten Produktionsprozesses erforderlich. Das Buch befaßt sich mit **einem** Abschnitt der Keramiktechnologie, der *Formgebung*. Dabei gilt das Hauptaugenmerk dem Zusammenwirken von aufbereiteter Masse, Formgebungsverfahren und maschinentechnischer Umsetzung in den verschiedenen Zweigen der Keramikindustrie (Geschirr-, Konstruktions- und Funktionskeramik, Bau- und Grobkeramik, Sanitär- sowie Feuerfestkeramik).
Die Autoren gehen bei der Gliederung von der Massekonsistenz aus, d. h. dem flüssigen, bildsamen sowie unplastischen Zustand, und erläutern die grundsätzlichen physiko-chemischen Zusammenhänge, die daraus resultierenden verfahrenstechnischen und speziellen maschinentechnischen Lösungen. Problemegeeigneter Sensoren, Steuernugen und der Formgebungswerkzeuge werden in die Ausführungen integriert.

Theoretische Verallgemeinerungen und produktionstechnische Erfahrungen für den Praktiker sind zu etwa gleichen Anteilen enthalten. Das Buch wendet sich einerseits an die Studenten, die später in der modernen Keramikindustrie tätig sein werden, und andererseits an den Wissenschaftler, Technologen sowie auch den Keramikmaschinenkonstrukteur. Letzterer soll Verständnis für die stofflichen und verfahrenstechnischen Probleme erhalten, die die Besonderheiten der Keramikmaschine bewirken.
Neben in der Produktion bestens bewährten Maschinen und Technologien vermittelt das Buch gleichzeitig einen Einblick in Entwicklungstendenzen der Keramikformgebung.

vorn: Drehmaschine für Becher, Schalen und Teller D Be T 1 (Thuringia)

Keramikformgebung

Prof. Dr.-Ing. Dr. oec.
Dagmar Hülsenberg
(Federführung)

Technische Hochschule Ilmenau

Doz. Dr. sc. techn.
Horst-Günter Krüger
(Kapitel 2 und 3)

Technische Hochschule Ilmenau

Dipl.-Ing.
Wolfgang Steiner
(Kapitel 4, ohne Abschnitt 4.3.4.3.)

VEB Thuringia Sonneberg,
Kombinat für Glas-
und Keramikmaschinenbau

Keramik-formgebung

Mit 189 Bildern und 34 Tabellen

VEB Deutscher Verlag
für Grundstoffindustrie, Leipzig

Abschnitt 4.3.4.3. wurde von
Dipl.-Ing. *J. Sauer* und
Dipl.-Ing. *H.-U. Hamberger*,
VEB Thuringia Sonneberg,
Kombinat für Glas- und
Keramikmaschinenbau, erarbeitet.

ISBN 3-342-00267-0

© VEB Deutscher Verlag
für Grundstoffindustrie, Leipzig 1987
VLN 152-915/55/87
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung:
Fachbuchdruck Naumburg (Saale)
Lektor: Dipl.-Krist. Karin-Barbara Köhler
Redaktionsschluß: 28. 2. 1986
LSV 3954
Bestell-Nr. 542 052 7
04800

Vorwort

Die im wesentlichen auf heimischer Rohstoffbasis arbeitenden Bereiche der Keramikindustrie haben in den vergangenen Jahren eine beträchtliche Steigerung ihrer Produktion zu verzeichnen. Das gilt sowohl für die traditionellen Erzeugnisse, z. B. die Bau- und Geschirrkeramik, als auch für den sich progressiv ausdehnenden Bereich der technischen Keramik. Konstruktions- und Funktionskeramiken werden in Zukunft das Niveau und den Einsatzumfang von Hochtechnologien mitbestimmen, und die Beherrschung ihrer Herstellung sagt etwas über den Stand der Keramikindustrie eines Landes aus. Diese rasche Entwicklung steht erst an ihrem Anfang, und die wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse werden sich auf alle Zweige der Keramikindustrie auswirken.

Die quantitative und vor allem die qualitative Steigerung der Produktion von Keramikerzeugnissen ist nur möglich, wenn parallel eine Intensivierung ihrer Fertigung erfolgt. Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung sind ebenso anzuwenden wie neue steuerungstechnische Systeme, neue Sensor- und Antriebslösungen. Eine moderne Keramikfertigung ohne Mikroelektronik und Rechentechnik ist undenkbar. Die hohe Produktivität der Anlagen setzt modernste Technologien voraus. Für die Keramikindustrie bedeutet das, eine durchgängige Automatisierung des gesamten Produktionsprozesses zu erreichen. Während in der Baukeramik und der Feuerfestindustrie Großserien die Produktion bestimmen, verlangt der Markt für Geschirr- oder auch Elektrokeramikerzeugnisse ein schnelles Reagieren, d. h. Mittel- und Kleinserien bei kurzen Lieferfristen. Das bedingt eine flexible Fertigung, woraus sich völlig andere Forderungen an die Automatisierung als im vorgenannten Fall ableiten. Dabei kommt den Formgebungsmaschinen und der Art ihrer Verkettung in automatischen Fertigungslinien eine entscheidende Bedeutung zu.

Obwohl die Nachfrage nach hochqualitativem, formschönem, individuell (und das heißt in der Regel manuell) gefertigtem Porzellan für den persönlichen Bedarf nach wie vor steigt, setzt sich in allen Zweigen der Keramikindustrie die automatisierte, d. h. an Maschinen gebundene Produktion durch. Das hat nicht nur seine Ursache in der gegenüber der manuellen Herstellung weitaus höheren Produktivität. Einerseits unterscheiden sich maschinell gefertigte Erzeugnisse in ihrer Formgestaltung kaum noch von denen aus einem Manufakturbetrieb (von Zierkeramik abgesehen), andererseits kommen für die technische, die Bau- und Feuerfestkeramik manuelle Formgebungsverfahren nicht in Frage, da sie in keiner Weise den aktuellen und ständig steigenden Forderungen nach Einhaltung von Toleranzen und Qualitätsparametern entsprechen. Für Keramikerzeugnisse zum Einsatz in der Mikroelektronik oder auch für die Herstellung von Geschirr auf durchgängig automatisierten Linien beginnen sich bereits sensorgeführte Maschinen durchzusetzen. Diese Entwicklung steht jedoch noch an ihrem Anfang. Nicht zuletzt gestattet es die maschinelle Herstellung keramischer Erzeugnisse, z. B. in der Sanitärkeramikindustrie, Arbeitserschwernisse abzubauen. Das bedeutet, daß heute in den Keramikbetrieben die maschinelle Fertigung mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad dominiert.

Im Unterschied zu anderen Keramikfachbüchern

werden im vorliegenden nicht die einzelnen Prozeßstufen, wie Masseaufbereitung, Formgebung, Trocknen, Sintern und Veredeln, sowie die Keramikerzeugnisse und ihre Eigenschaften im Komplex dargestellt, sondern es geht nur um *eine* Prozeßstufe, die Formgebung. Dabei kommt es den Autoren darauf an, das Zusammenwirken von Rohstoff und Masseeigenschaften, Forderungen an das Erzeugnis, eingesetztem Formgebungsverfahren und ausgewählten Maschinen zu zeigen, d. h. den technologischen Aspekt der Formgebung zu behandeln.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden theoretische Grundlagen in einem dem Rahmen des Buches angepaßten Umfang aufgenommen und eine stark verallgemeinernde Darstellungsweise gewählt. Damit wird vor allem dem Anliegen als Hochschullehrbuch für die technologisch orientierte Ingenieurausbildung Rechnung getragen. Das Buch soll dem Absolventen in der Keramikfertigung und ebenso im Keramikmaschinenbau wichtige Grundkenntnisse vermitteln.

Gleichzeitig werden aber auch in breitem Umfang detaillierte, anlagenorientierte praktische Kenntnisse und Erfahrungen vermittelt. Modernste Grundlagen und Erfahrungen aus der täglichen Produktion stehen somit nebeneinander. Die Absicht des Buches besteht darin, dem Technologen im Betrieb eine Basis für die Bestimmung der besten Fahrweise von Keramikformgebungsmaschinen unter Berücksichtigung der konkreten keramischen Massen zu geben. Gleichzeitig soll der Konstrukteur von Formgebungsmaschinen Verständnis für die keramischen Probleme erhalten, die bei der Entwicklung von entsprechenden Maschinen und Anlagen zu berücksichtigen sind.

Außerdem vermittelt das Buch einen Einblick in mögliche Entwicklungstendenzen der Keramikformgebung, wobei sich zum Zeitpunkt des Erscheinens der wissenschaftliche und technische Stand weiterentwickelt haben wird. Die Autoren sind deshalb Hinweisen für eine weitere Auflage des Buches sehr dankbar.

Für die inhaltliche Unterstützung bei der Erarbeitung des Manuskriptes wird vor allem dem VEB Thuringia Sonneberg, Kombinat für Glas- und Keramikmaschinenbau, herzlich gedankt. Das gilt insbesondere Dipl.-Ing. *Thomas Röthig* und Dipl.-Ing. *Günter Ferrière*, deren fachliche Kenntnisse in das Buch eingeflossen sind. Zu besonderem Dank sind die Autoren dem Förderer und Gutachter für das Buch, Dipl.-Ing. *Gernlein*, und Dr.-Ing. *Röhrs* als weiterem Gutachter verpflichtet. Um die technische Fertigstellung des Manuskriptes haben sich dankenswerterweise die Kolleginnen *Bergmann* und *Voigt* von der Technischen Hochschule Ilmenau sowie Kolln. *Beyer*, Kolln. *Steiner* und Koll. *Althans* von Thuringia Sonneberg verdient gemacht. Dem VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, sowie der Druckerei gilt der besondere Dank der Autoren bei der redaktionellen Bearbeitung und drucktechnischen Fertigstellung des Buches.

Prof. Dr.-Ing. Dr. oec.
Dagmar Hülsenberg

Inhaltsverzeichnis

1.	**Einführung**	11
2.	**Rheologische Eigenschaften keramischer Massen**	13
2.1.	Wechselwirkung zwischen keramischer Masse und Formgebungsprozeß	13
2.2.	Funktion und Eigenschaften der Massebestandteile	14
	2.2.1. Plastische Bestandteile	14
	2.2.1.1. Natur und Gestalt der Tonminerale	14
	2.2.1.2. Ladungserwerb und Ausbildung der elektrischen Doppelschicht	16
	2.2.1.3. Austauschfähige Kationen und ζ-Potential	17
	2.2.2. Unplastische Bestandteile	19
2.3.	Für die Formgebung notwendige Konsistenz der keramischen Massen	19
	2.3.1. Flüssiger Zustand keramischer Massen	20
	2.3.2. Bildsamer Zustand keramischer Massen	24
	2.3.3. Trockener Zustand keramischer Massen	26
2.4.	Rheologische Grundbegriffe	28
	2.4.1. Viskosität	28
	2.4.2. Fließkurven von keramischen Massen	28
2.5.	Meßtechnische Erfassung der für die Formgebung wichtigen Eigenschaften	30
	2.5.1. Feuchtigkeitsmeßverfahren	30
	2.5.2. Meßverfahren zur Beurteilung der Fließeigenschaften keramischer Suspensionen	31
	2.5.3. Beurteilung und meßtechnische Erfassung der Bildsamkeit	33
	2.5.4. Korngrößenanalysen	35
2.6.	Struktur und Textur von keramischen Massen und Rohlingen	36
3.	**Formgebungsverfahren**	38
3.1.	Gießen	38
	3.1.1. Vorbemerkungen	38
	3.1.2. Physikalisch-chemische Zusammenhänge zwischen Masseeigenschaften und Gießtechnologie	39
	3.1.2.1. Anforderungen an die Gießmasse und Ermittlung des optimalen Elektrolytgehaltes	39
	3.1.2.2. Verformungseigenschaften von Gießmassen	40

3.1.2.3. Einflüsse auf den Scherbenbildungsprozeß 43
3.1.3. Technischer Ablauf des Gießens und dabei auftretende Gesetzmäßigkeiten . 49
3.1.3.1. Hohlguß 49
3.1.3.2. Vollguß 51
3.1.3.3. Gießfehler und ihre Beseitigung 52
3.1.4. Spezielle Gießverfahren 55
3.1.4.1. Druckguß 55
3.1.4.2. Elektrophoretischer Guß 56
3.1.4.3. Foliengießen 58

3.2. Plastische Formgebung 59

3.2.1. Anforderungen an bildsame keramische Massen und ihre Verformungseigenschaften 59
3.2.2. Verflüssigungsmittelhaltige bildsame Massen 61
3.2.3. Strangpressen 63
3.2.3.1. Verfahrenstechnische Lösungen und Anwendungsbreite der Strangformgebung 63
3.2.3.2. Aufbau von Schneckenpressen und Funktionsprinzip 65
3.2.3.3. Grundlegende Zusammenhänge beim Schneckenpressen 66
3.2.3.4. Aufbereitungseffekte und keramische Probleme bei der Formgebung mit Schneckenpressen 68
3.2.3.5. Entstehung von Formgebungsfehlern beim Strangpressen 70
3.2.3.6. Erkennen und Beseitigen von Formgebungsfehlern beim Strangpressen . . 71
3.2.4. Rollerformgebung 72
3.2.4.1. Entwicklung des Rollerverfahrens 72
3.2.4.2. Arbeitsprinzip beim Überformen 73
3.2.4.3. Arbeitsprinzip beim Einformen 73
3.2.4.4. Physikalische Gesetzmäßigkeiten und keramische Probleme der Rollerformgebung 74
3.2.4.5. Fehler bei der Rollerformgebung 77
3.2.4.6. Vollendungsarbeiten 78
3.2.5. Weitere Formgebungsverfahren für bildsame Massen 79
3.2.5.1. Arbeitsweise von Streichmaschinen 79
3.2.5.2. Verarbeitung von Plastiks 80
3.2.5.3. Granulieren und Brikettieren 80
3.2.5.4. Nachpressen 81
3.2.5.5. Naßpressen 82
3.2.5.6. RAM-Pressen 82

3.3. Formgebung unplastischer Massen durch Pressen 83

3.3.1. Vorbemerkungen 83
3.3.2. Gesetzmäßigkeiten des Trockenpressens 84
3.3.2.1. Preßvorgang 84
3.3.2.2. Einfluß des Körnungsaufbaues auf die Packungsdichte 88
3.3.2.3. Wirkung von Preßhilfsmitteln 90
3.3.2.4. Besonderheiten beim Verpressen von Sprühgranulat 93
3.3.3. Möglichkeiten der verfahrenstechnischen Gestaltung von Preßvorgängen . 95
3.3.3.1. Übersicht 95
3.3.3.2. Einseitige Verpressung mit feststehender Form 95
3.3.3.3. Einseitige Oberdruckverpressung mit beweglichen Formen 96

3.3.3.4. Einseitige Unterdruckverpressung mit beweglichen Formen 98
3.3.3.5. Matrizenabzugsverfahren 99
3.3.3.6. Pressen mit doppelseitigem oder zweiseitigem Druck 100
3.3.3.7. Zweiseitendruck als Nacheinanderdruck 100
3.3.4. Technologische Einrichtungen zum Trockenpressen 101
3.3.5. Isostatisches Pressen 102
3.3.5.1. Arbeitsprinzip des isostatischen Pressens 102
3.3.5.2. Gesetzmäßigkeiten der isostatischen Verdichtung 102
3.3.5.3. Verfahrenstechnische Gestaltung isostatischer Preßeinrichtungen 105
3.3.5.4. Technologische Einrichtungen des isostatischen Pressens 107
3.3.6. Heißpressen 109

3.4. Spezielle Formgebungsverfahren für Massen unterschiedlicher Konsistenz 111

3.4.1. Spanabhebende Formgebung 111
3.4.1.1. Allgemeines 111
3.4.1.2. Arbeitsprinzipien von Kopierdrehmaschinen 111
3.4.1.3. Probleme für das Kopierdrehen von stranggezogenen Hubeln 113
3.4.2. Verfahren zur Verarbeitung feuerfester Gemenge 114
3.4.2.1. Entwicklungstendenzen 114
3.4.2.2. Stampfen und Vibrationsverdichten 114
3.4.2.3. Torkretieren 115
3.4.2.4. Slingern 116
3.4.3. Spritzgießen unplastischer keramischer Massen 117
3.4.3.1. Einführung 117
3.4.3.2. Anforderungen an das Spritzgießmedium 117
3.4.3.3. Trägermaterialien für das Spritzgießen 117
3.4.3.4. Fließverhalten von Spritzgießmassen 118
3.4.4. Spritzgießen und Spritzprägen bildsamer keramischer Massen 119
3.4.5. Reaktionsthermische Formgebung 119
3.4.6. Thermoplastische Formgebung 120
3.4.7. Explosivverdichten 120
3.4.7.1. Anwendungsgebiete der Explosivverdichtung 120
3.4.7.2. Verfahrensprinzipien der Explosivverdichtung 121

4. Spezielle Keramikformgebungsmaschinen 124

4.1. Gießanlagen 124
4.1.1. Einleitung 124
4.1.2. Gießlinie für Kleinteile GK 80 127
4.1.3. Fertigungslinie für Hohlware G 114 129
4.1.4. Halbautomatische Druckgußanlage DG 160 133

4.2. Maschinen und Anlagen zur bildsamen Formgebung keramischer Massen 137

4.2.1. Strangpressen 137
4.2.1.1. Vorbemerkungen 137
4.2.1.2. Vakuumpresse PVP 75 142
4.2.1.3. Automatische Fertigungslinie für keramische Strangpreßerzeugnisse der Elektrokeramikindustrie, Typ AFA 149
4.2.1.4. Vakuum-Aggregat »COMPACTA«, Typ PZVA 60a/56 152
4.2.2. Rolleranlagen 155

4.2.2.1. Vorbemerkungen . . . 155
4.2.2.2. Becherfertigungslinie Be 2-L . . . 160
4.2.2.3. Großgeschirrfertigungsanlagen Typ FH1 und FF1 . . . 164
4.2.3. Nach- und Naßpressen . . . 173
4.2.3.1. Vorbemerkungen . . . 173
4.2.3.2. Kurvenpreßautomat KPA 5 . . . 174
4.3. Maschinen und Anlagen zur Formgebung unplastischer keramischer Massen . . . 176
4.3.1. Kniehebelpressen . . . 176
4.3.2. Spindelpressen . . . 176
4.3.3. Exzenterpressen mit Matrizenabzug . . . 178
4.3.3.1. Wirkungsweise . . . 178
4.3.3.2. Hochleistungsexzenterpressen mit Matrizenabzug vom Typ TPA . . . 182
4.3.4. Hydraulische Pressen . . . 184
4.3.4.1. Wirkungsweise . . . 184
4.3.4.2. Hydraulische Fliesenpresse PY 500 . . . 187
4.3.4.3. Viersäulenoberkolbenpresse PYH 500 . . . 194
4.3.5. Drehtischpressen . . . 199
4.3.6. Pressen für isostatisches Verdichten . . . 201
4.3.6.1. Vorbemerkungen . . . 201
4.3.6.2. Isostatische Trockenpresse »isomat« . . . 202
4.3.6.3. Hydraulische Flachgeschirrpresse mit isostatischer Verdichtung, Fig. 230.02 205
4.3.6.4. Isostatische Preßautomaten, Typ PI . . . 208
4.4. Kopierdrehmaschinen . . . 212
4.4.1. Automatische Isolatoren-Kopierdrehmaschine, Typ 542 . . . 212
4.4.2. Weißkopierdrehmaschine SO-1-NC . . . 216

Literatur- und Quellenverzeichnis . . . 218

Sachwörterverzeichnis . . . 226

Einführung

1

Keramische Produkte sind im wesentlichen Zuliefererzeugnisse für die verschiedensten Zweige der Volkswirtschaft. Tonnagemäßig stehen die Erzeugnisse für das Bauwesen, wie Ziegeleiprodukte, Wand- und Bodenfliesen sowie Sanitärkeramik, im Vordergrund. Alle Hochtemperaturaggregate in der Metallurgie, in der chemischen Industrie, in den Kokereien, in den Zementwerken sowie in der Glas- und Keramikindustrie selbst werden mit feuerfesten Keramikwerkstoffen ausgekleidet. Die Energieübertragung erfolgt unter Nutzung von Porzellanisolatoren. Hochintegrierte elektronische Bauelemente erfordern Substrate und Gehäuse aus Oxidkeramik. Ohne keramische Ferrite ist die moderne Unterhaltungselektronik gegenwärtig undenkbar. In den hochentwickelten Industrieländern wird daran gearbeitet, solche Keramikerzeugnisse herzustellen, die z. B. im Motoren- und Turbinenbau, d. h. generell für Einsatzfälle mit extremen Forderungen an die Haltbarkeit der Werkstoffe, eingesetzt werden können. Konstruktions- und Funktionskeramiken bestimmen die Hochtechnologien der nächsten Jahre mit. Ihre Herstellung zu beherrschen ist Ausdruck des wissenschaftlich-technischen Niveaus eines Landes. Die Hochtemperaturmeßtechnik ist nur mit keramischem Isoliermaterial existenzfähig. Zunehmend werden die Eigenschaften spezieller Keramikwerkstoffe selbst für entsprechende Sensoren genutzt.

Die Aufzählung könnte beliebig fortgesetzt werden und zeigt in jedem Fall, daß die Forderungen an die Keramikprodukte äußerst unterschiedlich sind. Berücksichtigt man noch, daß die Geschirrproduktion und die Herstellung von Zierkeramik einen weiteren beträchtlichen Teil der Keramikfertigung ausmachen, kann man schlußfolgern, daß sich an alle Prozeßstufen der Herstellung von Keramikerzeugnissen unterschiedlichste Forderungen, abgeleitet aus dem Einsatzgebiet der Erzeugnisse, knüpfen. Das gilt auch für die Formgebung.

Ausgangspunkt für die keramische Formgebung ist die Masse, die aus meist natürlichen, in verschiedenem Grad aufbereiteten Rohstoffen besteht. Ihre Eigenschaften schwanken in vorgegebenen Grenzen. Kapitel 2 des vorliegenden Buches beschäftigt sich ausführlicher mit diesen Eigenschaften der Rohstoffe und Massen, wobei zunächst die aus den verschiedenen Rohstoffgruppen resultierenden grundsätzlichen Besonderheiten der Massen erläutert werden. Es erfolgt, wie auch in den folgenden Abschnitten, eine Einteilung der Massen in solche mit Schlikkerkonsistenz, in bildsame und in unplastische keramische Massen. Ausgehend von den physiko-chemischen Ursachen der Eigenschaften und dem rheologischen Verhalten der bildsamen Rohstoffe, werden die theoretischen Grundlagen für das Schlickergießen, die bildsame und die unplastische Formgebung behandelt, die verschiedenen Einflußfaktoren auf das Formgebungsverhalten konkreter Massen dargelegt und Meßverfahren für die Ermittlung der Eigenschaften dargestellt.

Kapitel 3 ist eng an Kapitel 2 gekoppelt und behandelt in ausführlicher Form die verschiedenen Formgebungsverfahren. In diesem Abschnitt wird der Zusammenhang zwischen der Masse, dem Formgebungsverfahren und der Formgebungsmaschine hergestellt, wobei auf konkrete betriebliche Anwendungsfälle Bezug genommen wird. Für den Praktiker von besonderem In-

teresse ist die ausführliche Darstellung eventueller Formgebungsfehler und der Möglichkeiten ihrer Beseitigung.

Neben der Behandlung der Technologien des Gießens, Strangziehens, Rollens, Trockenpressens, isostatischen Pressens und Kopierdrehens werden auch solche Formgebungsverfahren einbezogen, die heute noch als Sonderverfahren gelten oder die sich im Stadium der Erprobung befinden. Nicht eingegangen wird auf Verfahren, die eindeutig z. B. der Metallurgie entlehnt sind, wie die Herstellung schmelzflüssig gegossener Erzeugnisse, oder wo sich eine aus der Betonherstellung übertragene Verfestigung an die Formgebung anschließt, wie hitzebeständige Fertigbauteile auf Basis Feuerbeton.

Kapitel 4 beinhaltet einige ausgewählte Formgebungsmaschinen. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die maschinentechnische Realisierung der in Kapitel 3 vorgestellten Formgebungsverfahren zu einer solchen Vielzahl an speziellen Maschinen geführt hat, daß in gar keiner Weise die Möglichkeit besteht, in einem Buch, das sich zu einem großen Teil mit technologischen Fragen der Keramikformgebung beschäftigt, auch nur näherungsweise einen befriedigenden Überblick zu geben. Deshalb wurde von Anfang an auf die ausführliche Darstellung einiger weniger Maschinen orientiert, die sich international bewährt haben und den technischen Stand des Jahres 1985 repräsentieren. Sie stehen stellvertretend für viele andere und zeichnen sich in der Regel durch Besonderheiten, z. B. in der Steuerung, aus, worauf dann ausführlicher am konkreten Objekt eingegangen wird.

Die Wirkungsweise und der Aufbau der Maschinen werden erläutert, Hinweise zur Einsatzvorbereitung gegeben, Aussagen zu Fehlermöglichkeiten und ihrer Beseitigung sowie zur Wartung der Maschinen getroffen. Da auf dem Gebiet der Keramikmaschinen eine stürmische Entwicklung zu verzeichnen ist, würde außerdem eine Darstellung sehr vieler Einzelmaschinen zu einer schnellen Veraltung des Buches führen.

Wo es sich anbietet, wird auf die Verkettung der Formgebungsmaschinen in kompletten Fertigungslinien, auf Fragen der Flexibilität, der Umrüstbarkeit u. ä. eingegangen.

Rheologische Eigenschaften keramischer Massen

2

Das Verständnis der rheologischen Gesetzmäßigkeiten, denen keramische Massen bei der Formgebung unterliegen, und das bewußte Ausnutzen dieser Gesetzmäßigkeiten sind entscheidende Voraussetzungen für die Mechanisierung und Automatisierung des Formgebungsprozesses. Aus diesem Grunde wird im vorliegenden Buch der Behandlung des rheologischen Verhaltens keramischer Massen ein relativ breiter Raum gegeben.

2.1. Wechselwirkung zwischen keramischer Masse und Formgebungsprozeß

Das aus der Vielzahl der Möglichkeiten auszuwählende Formgebungsverfahren wird im wesentlichen bestimmt durch

- die keramische Masse,
- die herzustellende Erzeugnisform,
- die Anzahl der zu produzierenden Erzeugnisse,
- die erforderliche Produktivität und
- die Selbstkosten.

Während die letzten vier Anstriche als Einflußfaktoren auf die Formgebung in Abschnitt 2. nicht näher behandelt werden sollen, ist es zunächst erforderlich, sich sehr ausführlich mit der Wechselwirkung zwischen der keramischen Masse und dem Formgebungsverfahren zu beschäftigen.

Was verstehen wir unter keramischen Massen? Sie stellen eine unter Zuhilfenahme von Wasser oder anderen Dispergierungsmitteln erzielte, möglichst homogene Mischung mehrerer Rohstoffe dar, wobei die Rohstoffe in zwei Gruppen unterteilt werden, die plastischen und die unplastischen. Zu den plastischen Rohstoffen gehören die Tone, Kaoline, Bentonite, Talkum und andere schichtmineralhaltige Rohstoffe, während man z. B. Sand, Feldspat, Kalk und Dolomit zu den unplastischen Rohstoffen zählt.

Grundsätzlich kommen drei Kategorien von Formgebungsverfahren zum Einsatz:

- Läßt sich eine Masse verflüssigen, dann kann die Formgebung z. B. durch Gießen erfolgen.
- Besitzt sie einen relativ hohen Anteil an plastischen Rohstoffen und eine entsprechende Konsistenz, kommen die plastischen Formgebungsverfahren, wie Rollen, Quetschen, Abdrehen, Stampfen, Strangziehen und Naßpressen, in Frage.
- Besteht die keramische Masse in erster Linie aus unplastischen Rohstoffen und ist gleichzeitig wenig Dispergierungsmittel vorhanden, bleibt als hauptsächliche Formgebungsmöglichkeit das Pressen übrig, wobei es viele Modifizierungen dieser Technologie gibt.

Außerdem existiert eine Reihe von Sonderverfahren, die sich in die o. g. Gliederung nur schwer oder gar nicht einordnen lassen. Dazu gehören u. a.

- das Kopierdrehen im lederharten und weißtrockenen Zustand sowie
- das Spritzgießen unter Zuhilfenahme von Thermoplasten und Wachsen.

Bestimmte Formgebungsverfahren, wie das Gießen oder die plastische Formgebung, scheiden von vornherein aus, wenn eine Verflüssigung

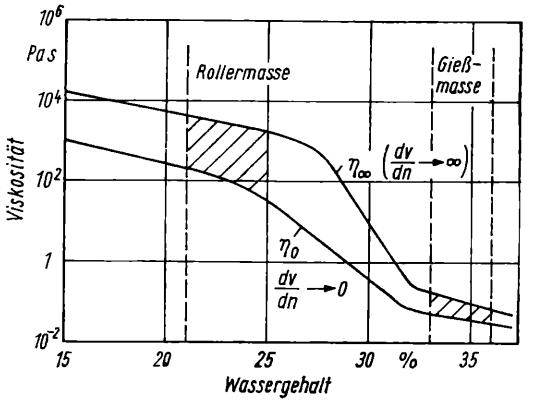


Bild 2.1. Konsistenz einer gegebenen Porzellanmasse in Abhängigkeit vom Wassergehalt [1]

der Masse nicht möglich ist oder die Masse keine Bestandteile enthält, die eine plastische Formgebung gewährleisten. Liegt aber eine »klassische« keramische Masse mit etwa 50 % plastischen Bestandteilen vor, so ist es durch Variierung des Anteils an Dispergierungsmitteln (in der Regel Wasser) möglich, die Masse in jede entsprechend der gewählten Formgebungstechnologie erforderliche Konsistenz zu überführen. Bild 2.1 zeigt die Viskosität in Abhängigkeit vom Wassergehalt für eine Porzellanroller- und -gießmasse. Auf die verwendeten Begriffe und Symbole wird in Abschnitt 2.4. eingegangen.

Für alle Formgebungsverfahren gleichermaßen gilt die Forderung, ein homogenes Erzeugnis zu erzielen. Das setzt voraus, daß bereits die Masse einen homogenen Aufbau besitzt. Diese Anforderungen, von *Haase* [2] als Homogenitätsprinzip definiert, umfassen

- die chemische und mineralogische Zusammensetzung,
- die Feuchtigkeit,
- die Korngrößenverteilung und Packungsdichte,
- die makrotexturfreie Anordnung der Teilchen und
- die Verteilung der Luft.

Wie streng die Einhaltung dieses Homogenitätsprinzips gefordert werden muß, hängt vom herzustellenden Erzeugnis ab. In jedem Fall, gleichgültig, ob es sich um ein Erzeugnis der Grob- oder Feinkeramik handelt, ist die Kenntnis der Masseeigenschaften Voraussetzung für die wissenschaftliche Durchdringung des Formgebungsprozesses. Diese Kenntnis basiert im wesentlichen auf dem Verständnis des Verhaltens der plastischen Bestandteile, d. h. den Eigenschaften der entsprechenden Minerale, die zusammenfassend als Tonminerale bezeichnet werden.

2.2. Funktion und Eigenschaften der Massebestandteile

2.2.1. Plastische Bestandteile

2.2.1.1. Natur und Gestalt der Tonminerale

Kaoline, Tone im engeren Sinne und Bentonite sind die Träger der Tonminerale. Hauptbestandteile der Kaoline sind die Tonminerale der Kaolinitgruppe – Kaolinit und Halloysit. Bentonite enthalten vornehmlich die Minerale der Montmorillonitgruppe, wie Montmorillonit, Beidellit, Nontronit, Saponit, Hectorit u. a. Tone im engeren Sinne sind Sedimente auf sekundärer Lagerstätte, die in der Regel aus Feldspaten und Glimmern entstanden sind. Je nach ihrer Entstehung enthalten sie Tonminerale der Kaolinitgruppe, der Montmorillonitgruppe oder Glimmermineralien, hauptsächlich Illite.

Die verschiedenen Tonminerale gehören ihrer Natur nach alle zu den Schichtsilicaten. Sie sind vorwiegend kristallin. Jedoch gibt es auch einige amorphe, wasserhaltige Aluminium- oder Eisensilicate, die aber für die keramische Technik von untergeordneter Bedeutung sind.

Das Schichtpaket des Kaolinits läßt sich entsprechend Bild 2.2 vereinfacht als eine flächen-

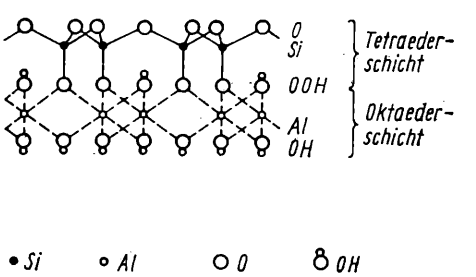


Bild 2.2. Idealisierte Struktur des Kaolinits [3]

förmige Verknüpfung einer SiO_4^{4-}-Tetraederschicht mit einer oktaedrisch koordinierten $Al(OH)_3$-Schicht darstellen. Die Verknüpfung erfolgt in der Form, daß auf einer Seite der $Al(OH)_3$-Schicht zwei Drittel der dortigen OH^--Gruppen durch O^{2-}-Ionen der SiO_4^{4-}-Tetraederschicht besetzt sind. Da beim Kaolinit nur zwei Schichten untereinander verbunden sind und von den verfügbaren Oktaederlücken nur $^2/_3$ durch Al^{3+}-Ionen besetzt werden können, gehört dieses Mineral in die Klasse der dioktaedrischen Zweischichtsilicate. Somit ergibt sich für die Struktureinheit die Formel $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. Jedes einzelne Schichtpaket des Kaolinits ist elektrostatisch abgesättigt. Trotzdem besteht wegen der Wasserstoffbindung (Verschiebung der Ladungsschwerpunkte) zwischen den O^{2-}-Ionen der Basisebene und den OH^--Ionen des darunterliegenden Schichtpaketes eine beträchtliche Anziehungskraft [4].

Innerhalb einer Schicht ist der Zusammenhalt der Ionen wesentlich stärker als zwischen den Schichten. Hierbei wirkt die SiO_4^{4-}-Tetraederschicht stabilisierend auf die Oktaederschicht. Die Spaltbarkeit ist somit senkrecht zu den Schichten wesentlich schlechter als parallel zur Basisebene (Schichtebene). Im Elektronenmikroskop läßt sich häufig eine pseudohexagonale Struktur identifizieren (Bild 2.3). Innerhalb dieser Struktur gibt es verschiedene polymorphe Modifikationen, die unter den Mineralbezeichnungen Nakrit, Dickit und Kaolinit bekannt sind und sich lediglich in der Anordnung der Schichtpakete unterscheiden.

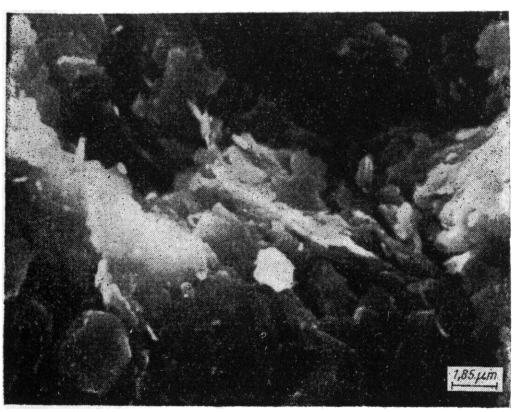


Bild 2.3. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Kaolin

Der strukturelle Aufbau der anderen Tonminerale ist komplizierter als der des Kaolinits. Indem man Zweischicht-, Dreischicht- und Vierschichtminerale unterscheidet, kann ihre Struktur aber hinreichend charakterisiert werden. Das Kriterium dafür ist das Verhältnis der SiO_4^{4-}-Tetraeder- und $Al(OH)_3$-Oktaederschichten im Schichtpaket:

- Zweischichtminerale (1:1-Minerale), bestehend aus einer Tetraeder- und einer Oktaederschicht, z. B. Kaolinit und Halloysit;
- Dreischichtminerale (2:1-Minerale) mit zwei Tetraederschichten und einer Oktaederschicht, z. B. Montmorillonit, Illit;
- Vierschichtminerale (2:2-Minerale) mit zwei Oktaederschichten und zwei Tetraederschichten, z. B. Chlorit.

Die Vielfältigkeit der in der Natur auftretenden Tonminerale ist zurückzuführen auf

- eindimensionale Lagenfehlordnung, d. h. von der gesetzmäßigen Folge abweichende Stapelung der Schichten, z. B. Minerale der Kaolinitgruppe,
- Artenfehlordnung, z. B. Illit/Smectit-mixed layer (Wechsellagerung),
- isomorpher Ersatz von Kationen in den Schichten.

Bei Wahrung der sterischen Verhältnisse und der Elektroneutralität können folgende isomorphe Besetzungen in den Schichten auftreten [5], die bei periodischer Wiederholung zu selbständigen Mineralen führen:

- *Tetraederschicht*
  Si^{4+} ersetzt durch Al^{3+} oder Fe^{3+}
- *Oktaederschicht*
  · volle Besetzung mit zweiwertigen Ionen (Mg^{2+}, Fe^{2+}, Zn^{2+}) – trioktaedrische Minerale,
  · volle Besetzung mit dreiwertigen Ionen (Al^{3+}, Fe^{3+}) auf $^2/_3$ aller möglichen Plätze – dioktaedrische Minerale,
  · teilweise Besetzung mit zwei- und dreiwertigen Ionen.

Findet dieser isomorphe Ersatz an Rand- und Zwischenschichtplätzen zufällig statt, d. h. in Form von Fehlordnungen, kann sich daraus ein negativer Ladungsüberschuß ergeben, da an die

Stelle des Si^{4+} in den Tetraedern das Al^{3+} und Fe^{3+} bzw. an die Stelle des Al^{3+} in den Oktaedern das Mg^{2+}, Fe^{2+} usw. treten. Dieser Überschuß an negativer Ladung wird zwischen den Schichten und an den Rändern mit positiven Kationen gebunden. Es kommen dafür in erster Linie Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} und H_3O^+ in Frage. Da diese Kationen zwar formal die Elektroneutralität herstellen, aber nicht so fest an die Minerale gebunden sind wie die Ionen, die sich in den Schichten befinden, lassen sie sich untereinander oder gegen andere Kationen austauschen.

Für die keramische Formgebung sind die Teilchengröße und die anisometrische Teilchengestalt bedeutsam. Da die Tonminerale aufgrund der Schichtstruktur vornehmlich eine plättchen- oder leistenförmige Gestalt besitzen, wird der größte Teil der Oberfläche von den beiden Basisflächen gebildet. Kaolinite, die in der Regel sechseckige Kristalle mit Kantenwinkeln von 120° ausbilden, sind im Durchmesser etwa 8- bis 30mal größer als in der Dicke. Bei einem äquivalenten Durchmesser der Tonmineralien von 1 bis 10^{-3} µm liegen diese in der Regel, zumindest aber in einer Dimension, im Bereich kolloider Größenordnungen. Dementsprechend haben Tonsuspensionen die für kolloide Dispersionen typischen Verhaltensmerkmale.

2.2.1.2. Ladungserwerb und Ausbildung der elektrischen Doppelschicht

Wie bereits im vorstehenden Abschnitt erwähnt, ist die negative Ladung der Tonmineralteilchen die Voraussetzung für die Anlagerung der austauschfähigen Kationen.

Für den Erwerb der negativen Ladung kommen bei Tonmineralien im wesentlichen drei Möglichkeiten in Betracht:

- diadocher Ersatz durch Ionen geringerer Wertigkeit an Rand- und Zwischenschichtplätzen (In Form von Fehlordnungen können an die Stelle des Si^{4+} in den Tetraederschichten das Al^{3+} oder das Fe^{3+} und für das Al^{3+} in den Oktaederschichten das Mg^{2+}, Fe^{2+} u. a. treten.),
- Löslichkeit von Oberflächenionen in der wäßrigen Phase (An diesem Vorgang sind außer den Alkalien und Erdalkalien, die den Hauptteil der gelösten Ionen bilden, auch Silicium und Aluminium beteiligt.),
- Adsorption spezieller Ionen (Adsorptionskräfte sind nur über molekulare Dimensionen wirksam. Abstand, Größe, Form, Ladung und thermische Energie bestimmen die Adsorbierbarkeit von Ionen und Ionengruppen an der Kristalloberfläche.).

Die Oberflächenladung der festen Phase wird in der Nähe der Phasengrenze fest-flüssig durch entgegengesetzte Ladungsträger ausgeglichen. Bedingt durch die elektrostatischen Anziehungskräfte, wird der eine Teil der Gegenionen in einer starren inneren Schicht und der andere Teil der Ladungsträger infolge von Wärmebewegung und Diffusionsvorgängen in einer diffusen äußeren Schicht um das Teilchen angelagert. Der gesamte Vorgang ist von einer Hydratation der adsorbierenden Oberfläche des Teilchens und der adsorbierten Ionen begleitet. Der diffuse Anteil stellt somit eine Solvathülle dar, die angereicherte Ionen der gelösten Substanz und Dipole des Dispergierungsmittels enthält. Starrer und diffuser Anteil bilden zusammen die elektrische Doppelschicht (Bild 2.4).

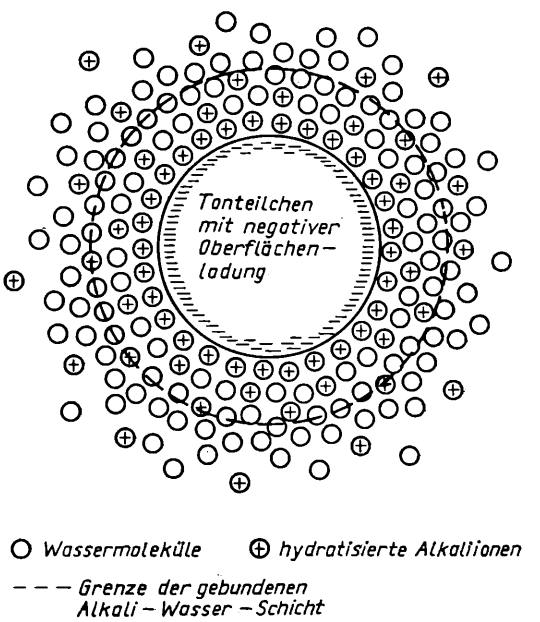


Bild 2.4. Schematischer Aufbau der Doppelschicht um Tonmineralteilchen [6]

Besonderheiten des Ladungserwerbes resultieren aus der Spaltbarkeit der Tonmineralien. Ein Bruch der Teilchen durch äußere Kräfte ist in zwei Richtungen möglich. In der Basisebene bewirkt er das Aufbrechen der Wasserstoffbrückenbindung. Ein Bruch senkrecht zur Basisfläche führt zum Aufbrechen der Bindungen des Si^{4+} und Al^{3+}. Diese Unterschiede haben zur Folge, daß die Partikeln an den Kanten eine andere Doppelschicht ausbilden als an den Basisflächen. Die aufgebrochenen, hochaktiven Bindungen der Kanten werden durch OH^--Gruppen sofort abgesättigt, weil diese aufgrund ihrer geringen Größe und hohen Bindungsenergie bevorzugt angelagert werden.

Es entsteht ein Hydroxid, Me—OH, vorzugsweise das des Aluminiums, da die Partikeln in der Regel an den Stellen brechen, bei denen Si^{4+} durch Al^{3+} diadoch ersetzt ist [7]. Je nach *p*H-Wert nimmt das Hydroxid eine positive oder negative Ladung an [8], s. Gln. (2.1) und (2.2):

$$Me—OH + H_3O^+ \rightleftharpoons Me—OH_2^+ + H_2O \qquad (2.1)$$

$$Me—OH + OH^- \rightleftharpoons Me—O^- + H_2O \qquad (2.2)$$

Diese Ladung wird durch Ionen, die die Doppelschicht der Kanten bilden, ausgeglichen. Nach Gleichung (2.1) besteht somit die Möglichkeit, daß im sauren Milieu die Kantenladung positiv werden kann. Einschränkend muß allerdings bemerkt werden, daß die Feldstärke der mehrwertigen Metallionen größer als die des H_3O^+ ist, so daß bis weit in den sauren Bereich die Reaktion nach Gleichung (2.2) überwiegt [9, 10] und demzufolge in realen keramischen Suspensionen eine schwache, negative Kantenladung vorherrschend ist.

Anders sind die Verhältnisse bei den Partikelflächen. Insbesondere als Folge des oben erwähnten diadochen Ersatzes werden entsprechende Gegenionen an die Partikelflächen angelagert. Durch sie sind die Tonmineralien in der Lage, ihre Elektroneutralität formal zu sichern. Die Kationen stellen ihrerseits positive Ladungsbezirke dar, um die sich weitere Ladungsträger anlagern können.

2.2.1.3. Austauschfähige Kationen und ζ-Potential

Die Menge der austauschfähigen Kationen, die sogenannte Kationenaustauschkapazität, ist von der wirksamen spezifischen Oberfläche der Teilchen und dem Ausmaß der negativen Ladung abhängig. Die Kationenaustauschkapazität wird in mval/100 g Substanz angegeben und liegt für Tonmineralien in folgender Größenordnung [11]:

Kaolinit	3 bis 15 mval/100 g
Illit	20 bis 40 mval/100 g
Montmorillonit	60 bis 150 mval/100 g.

Sie läßt sich quantitativ ermitteln, indem durch eine gezielte Belegung mit einer anderen Kationenart die vorhandenen Kationen ausgetauscht werden. Die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität nach der NH_4^+-Acetatmethode ist in TGL 24747 festgelegt.

Bei der Angabe der Kationenaustauschkapazität unterscheidet man zwischen

- der Sorptionskapazität (S-Wert) und
- der totalen Sorptionskapazität (T-Wert).

Der S-Wert umfaßt die ausgetauschte Menge an Alkali- und Erdalkaliionen, der T-Wert ist die Austauschkapazität für alle Kationen, einschließlich H^+-Ionen.

Von besonderer Bedeutung sind die austauschbaren Kationen für die Stabilität keramischer Suspensionen. Art und Menge der angelagerten Kationen bestimmen den Potentialverlauf in der Doppelschicht und damit die elektrostatische Abstoßung der Teilchen.

Bild 2.5 zeigt schematisch die Ionenverteilung bei Kationenadsorption und den Potentialverlauf in Abhängigkeit des Abstandes x von der Phasengrenze fest-flüssig.

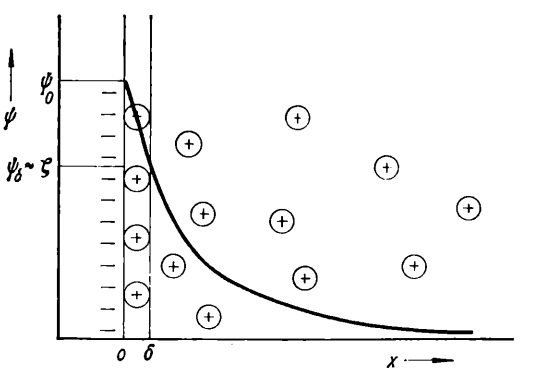


Bild 2.5. Ionenverteilung und Potentialverlauf bei Kationenadsorption

Da die Erfassung des gesamten Potentialverlaufes äußerst schwierig ist, begnügt man sich in der Praxis mit der experimentellen Ermittlung des sogenannten ζ-Potentials. Das ζ-Potential ist die wirksame Nettoladung eines Teilchens bei elektrokinetischen Transporterscheinungen. Seine Größe wird damit durch den Abstand der hydrodynamischen Gleitebene von der Teilchenoberfläche bestimmt, was in etwa dem Potential φ_δ zwischen dem starren und diffusen Teil der elektrischen Doppelschicht entspricht.

Das ζ-Potential läßt sich mit Hilfe der elektrophoretischen Wanderungsgeschwindigkeit ausdrücken und berechnen.

Wird in einer wäßrigen Dispersion ein elektrisches Gleichfeld mit der Feldstärke E realisiert, dann greifen an jedes sich bewegende Teilchen vier Kräfte an (Bild 2.6):

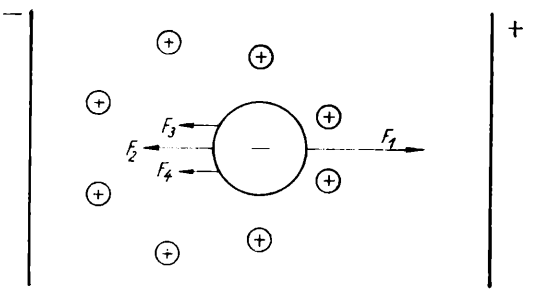


Bild 2.6. Elektromechanische Kräfte, die beim Anlegen eines elektrischen Feldes auf ein Teilchen wirken [12]

- F_1 ist nach Gl. (2.3) die *Coulomb*kraft, die vom Feld auf das Teilchen ausgeübt wird.

$$F_1 = z\,e\,E \tag{2.3}$$

  z Anzahl der Ladungen
  e Elementarladung
  E elektrische Feldstärke.

- F_2, s. Gl. (2.4), ist die Reibungskraft nach *Stokes* im Bereich kleiner *Reynolds*-Zahlen für kugelförmige Partikeln.

$$F_2 = -6\,\eta\,r\,v \tag{2.4}$$

  η Viskosität der Flüssigkeit
  r Teilchenradius (einschließlich Anteil bis zur Scherebene bzw. hydrodynamischen Gleitebene)
  v Geschwindigkeit.

- F_3 ist die elektrophoretische Bremsung der Teilchen, hervorgerufen durch die Wanderung der hydratisierten Gegenionen in entgegengesetzter Richtung.
- F_4 ist die Relaxationskraft, die durch die Unsymmetrie der Ladungsverteilung im beweglichen Teil der Doppelschicht hervorgerufen wird. Da die Partikeln und Gegenionen in unterschiedlicher Richtung wandern, muß die Doppelschicht hinter der Partikel abgebaut und vor der Partikel wieder aufgebaut werden, wozu eine kurze, aber definierte Relaxationszeit erforderlich ist.

Im stationären Zustand ist die Summe aller Kräfte Null:

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 0\,. \tag{2.5}$$

Unter Zuhilfenahme der Gln. (2.3) und (2.4) ergibt sich nach Gl. (2.6) die elektrophoretische Wanderungsgeschwindigkeit

$$v = \frac{1}{6\,\eta\,r}\,(z\,e\,E + F_3 + F_4). \tag{2.6}$$

Da die Kräfte F_3 und F_4 komplizierte Funktionen des ζ-Potentials, der Dicke der diffusen Doppelschicht und des Partikelradius sind, arbeitet man mit vereinfachten Ansätzen. Die bekanntesten stammen von *Hückel* und *Smoluchovskij* [12]. Der Ansatz (2.7) nach *Hückel* geht davon aus, daß die Teilchengröße im Gültigkeitsbereich des *Stokes*schen Gesetzes liegt und $\varkappa\,r \leqq 1$ ist ($\varkappa^{-1} \approx$ Dicke der Doppelschicht).

$$v = \frac{z\,e\,E}{6\,\pi\,\eta\,r} \tag{2.7}$$

Unter Zuhilfenahme des ζ-Potentials einer kugelförmigen Ionenwolke um die Partikeln folgt dann für die elektrophoretische Wanderungsgeschwindigkeit

$$v = \frac{\zeta\,\varepsilon_0\,\varepsilon\,E}{6\,\pi\,\eta}\,, \tag{2.8}$$

bzw. für das ζ-Potential

$$\zeta = \frac{6\,\pi\,v\,\eta}{\varepsilon_0\,\varepsilon\,E} \tag{2.9}$$

ζ ζ-Potential (in mV)
η Viskosität der Flüssigkeit (in Pa s)
v Wanderungsgeschwindigkeit (in mm s^{-1})
E Feldstärke (in V m^{-1})
ε_0 elektrische Feldkonstante ($= 8{,}859 \cdot 10^{-12}$ A s V^{-1} m^{-1})
ε Dielektrizitätskonstante der Flüssigkeit.

Die Größe des ζ-Potentials und damit das Ausmaß der Doppelschicht ist von der Anzahl der angelagerten Kationen, ihrer Größe und ihrer Ladung abhängig. Die Anlagerung kleiner Kationen mit niedriger Ladung bewirkt im allge-

meinen die Ausbildung einer dicken Doppelschicht. Das trifft insbesondere für die kleinen Alkaliionen zu, während Erdalkaliionen, wie durch einschlägige Messungen [13] belegt wurde, keine nennenswerte Doppelschicht ausbilden.
Die Ursache hierfür liegt insbesondere darin, daß die Ladung zweiwertiger Kationen so groß ist, daß sie als Austauschkationen die negative überschüssige Ladung von gleichzeitig entweder zwei Basisschichten oder einer Basisschicht und mehreren Randzonen absättigen können. Dabei wird durch die entsprechenden geometrischen Anordnungen der Tonmineralteilchen zueinander bereits dem geringeren Koordinationsbestreben der höherwertigen Kationen im Vergleich zu den einwertigen Rechnung getragen. Es werden nur wenig zusätzliche Wasserdipole benötigt, um die zweiwertigen Erdalkaliionen abzuschirmen.
Sind im Gegensatz dazu Alkaliionen zur Abbindung der überschüssigen negativen Restladung der Tonmineralteilchen vorhanden, wird um sie Wasser angelagert. Dieser Effekt wird gezielt zur Verflüssigung keramischer Massen ausgenutzt. Angaben über die Dicke der Wasserhüllen um die Tonmineralteilchen in Abhängigkeit von der Kationenbelegung werden von *Norton* und *Johnson* [14] sowie von *Wittaker* [15] gemacht. Letzterer gibt bei hauptsächlich Ca^{2+}-Belegung von Kaolinit eine Dicke der Doppelschicht von 9 bis 16 nm, für Bentonit sogar von 300 nm an.

2.2.2. Unplastische Bestandteile

Die für eine keramische Masse typischen Eigenschaften werden nicht nur durch die Tonminerale bestimmt. Keramische Massen sind Pulver, die neben den plastischen auch unplastische Bestandteile unterschiedlicher Eigenschaften und Menge enthalten oder sogar ausschließlich aus diesen bestehen. Ihr Anteil im Masseversatz wird durch

- die erzeugnisspezifischen Anforderungen an die chemisch-mineralogische Zusammensetzung,
- das Formgebungsverfahren,
- die Anforderungen an das rheologische Verhalten der Masse und
- das gewünschte Trocknungs- und Brennverhalten

bestimmt. Von besonderem Interesse für die Formgebung ist der Einfluß unplastischer Rohstoffe auf das rheologische Verhalten. Als Bestandteil plastischer Massen haben die unplastischen Rohstoffe die Funktion des Magerungsmittels. Das heißt, daß sie den Anteil und die Wirksamkeit der bildsamen Mineralien reduzieren und solche wichtigen Eigenschaften, wie den Anlaßwert der Masse, s. Abschnitt 2.3.2., die Trockenschwindung, die Ausbildung von Texturen und damit die Rißanfälligkeit, beeinflussen.
Unplastische Rohstoffe können in der keramischen Industrie in Form *natürlicher* Minerale oder als *synthetische* Rohstoffe eingesetzt werden.
Als Nebenbestandteile bildsamer Rohstoffe kommen sie z. B. als Quarz im Kaolin vor. In Ziegeltonen ist ihr Anteil oftmals so hoch, daß eine weitere Zugabe unplastischer Rohstoffe für die Verarbeitung des Materials nicht erforderlich wird. Neben Quarz treten in solchen Rohstoffvorkommen auch andere Mineralien, wie Feldspat, Glimmer, Calcit, Dolomit, Gips, Eisenverbindungen usw., auf. Bei den meisten Erzeugnissen, z. B. Porzellan, ist aufgrund der Zusammenstellung definierter Versätze die zusätzliche Einführung unplastischer Rohstoffe, im vorliegenden Fall von Feldspat und Quarz, erforderlich.
Unplastische synthetische Rohstoffe sind insbesondere für die technische, die Konstruktions- und Funktionskeramik von Bedeutung. Auch die Einführung von Scherben oder Rohschamotte in den Masseversatz fällt in diese Kategorie.
Das für die keramische Formgebung ausschlaggebende Kennzeichen unplastischer Rohstoffe ist ihre spezifische Oberfläche bzw. Korngröße. Nähere Ausführungen zur Korngrößenbestimmung und zum Einfluß der Korngrößen auf die Formgebung und die Verdichtung der Rohlinge beinhalten die Abschnitte 2.5.4 und 3.3.2.2.

2.3. Für die Formgebung notwendige Konsistenz der keramischen Massen

Entsprechend dem Anliegen des Buches soll im folgenden versucht werden, die Eignung be-

stimmter Typen von keramischen Massen für die zur Auswahl stehenden keramischen Formgebungsverfahren abzuleiten, wobei die rheologischen Begriffe erst im Abschnitt 2.4. ausführlich erläutert werden. Wesentlich für die Auswahl des Formgebungsverfahrens ist, wie in Abhängigkeit vom Wassergehalt bereits in Abschnitt 2.1. gezeigt wurde, die Fähigkeit der Massen, eine bestimmte Konsistenz anzunehmen, d. h., ob sie in flüssiger Form als Gießschlicker, in bildsamer Form für die Verarbeitung durch Strangpressen, Rollen, Drehen usw. oder in trockener, körniger oder pulvriger Form für z. B. das Trockenpressen vorliegen können. Dabei wird unter Konsistenz die Beschaffenheit halbfester Massen hinsichtlich ihrer mechanischen Verformbarkeit verstanden. In den sich anschließenden Abschnitten werden der flüssige, der bildsame und der trockene (pulvrige) Zustand der keramischen Massen näher behandelt.

2.3.1. Flüssiger Zustand keramischer Massen

Es ist einleuchtend, daß durch Erhöhung des Anteils an freibeweglichem Wasser, das die Kapillaren ausfüllt und die Rohstoffpartikeln weiter voneinander trennt, die keramische Masse einen gießfähigen Schlicker bilden kann. Aber auch allein durch Zusatz von Verflüssigungsmitteln wird erreicht, daß eine keramische Masse vom bildsam formbaren Zustand ohne Änderung des Wassergehaltes in den flüssigen, gießfähigen Zustand überführt wird.

Die Verflüssigung des Kaolins oder Tons in keramischen Gießmassen beruht im wesentlichen darauf, daß die austauschfähigen Calciumionen und teilweise auch Magnesiumionen durch Natriumionen ersetzt werden [16]. Entgegen früheren Vorstellungen, die den Verflüssigungsmechanismus allein über die Wirkung von OH^--Ionen und den *p*H-Wert erklärten, ist man heute der Ansicht, daß vor allem durch Veränderung des Aufbaus der elektrischen Doppelschicht bzw. des Potentialverlaufes in der Doppelschicht die Verflüssigung bewirkt wird.

Experimentell wurde entsprechend ihrer verflüssigenden Wirkung eine Reihe von austauschfähigen Kationen aufgestellt, die als *Hofmeister*-Serie [5] in die Literatur eingegangen ist (s. Tabelle 2.1). Für eine reine Kationenverflüssigung sind, wie aus Tabelle 2.1 hervorgeht, nur die Entflocker Li^+ und Na^+ geeignet. Von praktischer Bedeutung für die Herstellung von Gießmassen sind aber nur die Natriumverbindungen, so daß die typische Reaktion der Tonverflüssigung nach Gl. (2.10) abläuft.

$$\text{Ca-Tonmineral} + 2\,Na^+ \rightleftharpoons \text{Na}_2\text{-Tonmineral} + Ca^{2+} \tag{2.10}$$

Da diese Reaktion reversibel ist, eignen sich für eine Verflüssigung besonders solche Natriumverbindungen, die gleichzeitig Calciumionen ausfällen, s. Gln. (2.11) und (2.12):

$$\text{Ca-Tonmineral} + Na_2CO_3 \rightleftarrows \text{Na}_2\text{-Tonmineral} + CaCO_3 \tag{2.11}$$

$$\text{Ca-Tonmineral} + 2\,NaOH \rightleftarrows \text{Na}_2\text{-Tonmineral} + Ca(OH)_2 \tag{2.12}$$

Den Einfluß des Kationenaustausches auf den Potentialverlauf soll Bild 2.7 verdeutlichen. Hiernach ergeben sich bei Na^+-Belegung eine Zunahme der Doppelschichtdicke und damit ein weniger starker Abfall des Potentials mit dem Abstand x von der Phasengrenze fest-flüssig (Kurve *1*) als bei Ca^{2+}-Belegung (Kurve *2*).

Tabelle 2.1. *Hofmeister*-Serie der austauschfähigen Kationen

H^+ Al^{3+} Ba^{2+} Sr^{2+} Ca^{2+} Mg^{2+}			NH_4^+ K^+	Na^+ Li^+
Flocker			Zwischenglieder	Entflocker
abnehmend	←	ζ-Potential	→	zunehmend
abnehmend	←	Dicke der Doppelschicht	→	zunehmend
zunehmend	←	Plastizität	→	abnehmend
zunehmend	←	Viskosität	→	abnehmend

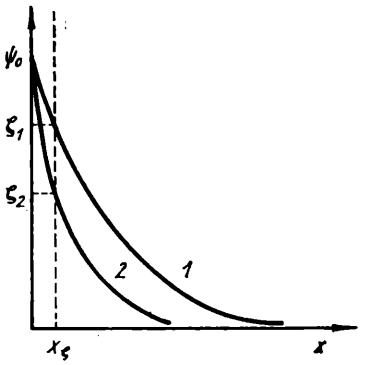


Bild 2.7. Potentialverlauf im Abstand x von der Phasengrenze fest-flüssig

1 Alkaliionenbelegung
2 Erdalkaliionenbelegung

Die eigentliche physikalische Ursache für die Verflüssigung ist eine Zunahme der *elektrostatischen Abstoßung* der Teilchen. Dadurch, daß disperse Teilchen in ihrer Doppelschicht die gleiche Anzahl von Gegenionen besitzen, sind sie außerhalb ihrer Doppelschicht als Neutralteilchen zu betrachten. Zu einer Wechselwirkung zwischen den Partikeln im Sinne der *Coulomb*schen Abstoßung kommt es erst, wenn zwei Partikeln einander so weit angenähert werden, daß sich ihre Doppelschichten durchdringen. Bild 2.8 beschreibt den Fall, bei dem zwei Partikeln einander angenähert werden, deren Durchmesser sehr viel größer als die Doppelschichtdicke sind. Erfolgt die Annäherung ohne Änderung des thermodynamischen Gleichgewichts so bleibt das Potential an der Phasengrenze ψ_0 erhalten. Es verringert sich aber die Ladung. Diese Abnahme der Ladung steht in engem Zusammenhang mit der Abstoßung der Teilchen, da die freie Energie der Doppelschicht der Oberflächenladung proportional ist [12]. Die Abstoßung der Partikeln ist demnach um so größer, je stärker sich die Doppelschichten durchdringen. Das bedeutet, daß bei gleichen Partikelabständen ein Potentialverlauf *1* (Bild 2.7) eine höhere elektrostatische Abstoßung bewirken wird als ein Potentialverlauf *2*.

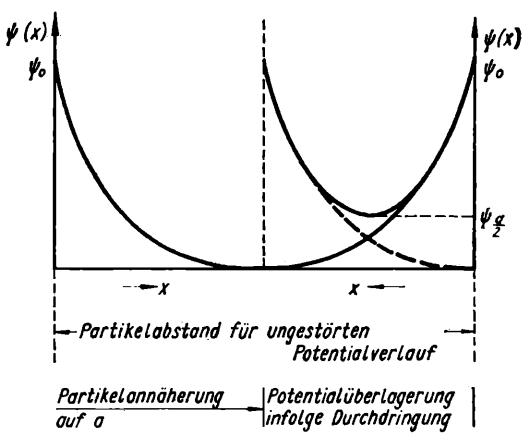


Bild 2.8. Elektrostatische Abstoßung bei Annäherung zweier Partikeln

Eine Erhöhung der elektrostatischen Abstoßung durch eine Verringerung der Partikelabstände ist nicht unbegrenzt möglich, weil die *Van-der-Waalsschen Anziehungskräfte* der elektrostatischen Abstoßung entgegenwirken. Die Erklärung für die Stabilität disperser Systeme auf der Grundlage der Wechselwirkung von elektrostatischen und *Van-der-Waals*schen Kräften wurde von *Derjaguin, Landau, Verwey* und *Overbeek* gegeben [12, 17]. Diese sogenannte DLVO-Theorie besagt, daß die Koagulationsmöglichkeit eines dispersen Systems von dem Vorzeichen und dem Betrag der aus beiden Kräften resultierenden Wechselwirkungsenergien abhängt. Da die Dispersionsenergie, die den Hauptanteil der Anziehungsenergie ausmacht, stets nach einer Funktion mit a^{-2} abklingt und die elektrostatische Energie nach einer Exponentialfunktion abnimmt, überwiegt bei geringen Partikelabständen die interpartikulare Anziehung. Bei einem bestimmten mittleren Abstand $\bar{a}$ erreicht das System seine größte Stabilität (Bild 2.9, S. 22).

Die Stabilität eines gegebenen keramischen Schlickers wird somit im wesentlichen durch zwei Faktoren beeinflußt:

- die Konzentration der festen Phase in der Suspension und
- den Elektrolytgehalt.

Mit der Konzentration der festen Phase sind die Partikelabstände vorgegeben. Der Elektrolytgehalt hat, wie Bild 2.7 zeigt, einen direkten Einfluß auf die elektrische Doppelschicht. Die Dipolwechselwirkung bleibt davon im wesentlichen unberührt. Das bedeutet, daß sich die Anziehungsenergie nicht oder nur geringfügig verändert. Somit ist die durch Erdalkaliionenbelegung der Tonmineralien bewirkte Tendenz zur

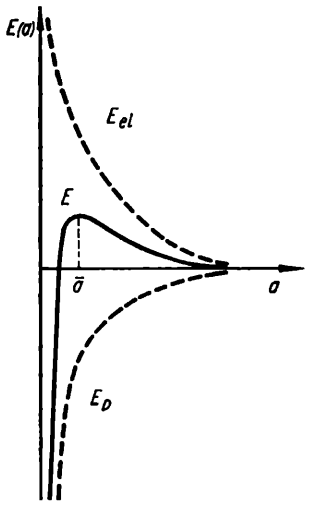


Bild 2.9. Wechselwirkungsenergie E in Abhängigkeit vom Partikelabstand

Flockung in erster Linie auf die Verringerung der elektrostatischen Energie zurückzuführen.
Mit der Tendenz zur Flockung ist die Ausbildung von Koagulationsstrukturen verbunden, die auch in keramischen Schlickern als strukturierte Teilchenaggregate oder als gut ausgebildete Kartenhausstrukturen in Erscheinung treten.
Im Zusammenhang mit der Kartenhausstruktur wird in Abschnitt 2.3.2. darauf verwiesen, daß Calciumionen eine höhere Bindungsenergie als Natriumionen besitzen. Diese Tatsache ist der Grund dafür, daß für den Ionenaustausch stets eine größere Natriummenge erforderlich ist, als stöchiometrisch notwendig wäre. Um die Unterschiede in der Bindungsenergie zu überbrücken, muß die Ionenart mit der schwächeren Bindung, in diesem Falle das Natrium, zuerst ihre geringere Substitutionskapazität durch eine größere Konzentration ausgleichen, um dann bei weiterer Konzentrationserhöhung überwiegen zu können [18].
Wie durch elektrokinetische Messungen bestätigt wurde, nimmt mit zunehmender Verflüssigung die Nettoladung der Teilchen (ζ-Potential) bis zum Minimum der Verflüssigungskurve (s. Bild 3.1., S. 40) zu [19, 20]. Das heißt aber nicht, daß Natriumionen das ζ-Potential generell erhöhen. Die verflüssigende Wirkung beruht darauf, daß Natriumionen das ζ-Potential nicht so stark erniedrigen wie Calcium- und Magnesiumionen, mit denen die Tonmineralien, bedingt durch die Härtebildner des Grundwassers und den Aufbereitungsprozeß, belegt sind.
Ein überhöhter Verflüssigerzusatz, also über das Optimum der Verflüssigung hinaus, bewirkt die Kompression der Doppelschichten. Das heißt, die Doppelschichten werden so dünn, daß die interpartikulare Anziehung wieder überwiegt.
Obwohl die Verflüssigung in den meisten Fällen den Natriumionen als solchen zugeschrieben wird, ergeben sich dennoch erhebliche Unterschiede für die einzelnen Na^+-haltigen Verflüssigungsmittel, weil neben den Kationen auch die Anionen die Verflüssigung beeinflussen. Auch für die Anionen existiert eine *Hofmeister*-Serie, die sich mit abnehmender Anlagerungsintensität von links nach rechts wie folgt ergibt:

$$OH^- \rightarrow CO_3^{2-} \rightarrow PO_4^{3-} \rightarrow Cl^- \rightarrow NO_3^- \rightarrow F^- \rightarrow \rightarrow SO_4^{2-}.$$

Aus kolloidchemischer Sicht können dehydratisierte Anionen direkt auf der Oberfläche der festen Phase, unabhängig von der Ladung derselben, in Form der inneren *Helmholtz*schicht angelagert werden [21]. Überlagert werden diese von den hydratisierten Gegenionen der äußeren *Helmholtz*schicht. Beide Anteile bilden den starren Teil der elektrischen Doppelschicht.
Von besonderer Bedeutung für die Verflüssigung ist die OH^--Konzentration in der Suspension, die in der Regel durch die Zugabe alkalisch reagierender Elektrolyte, wie Soda oder Wasserglas, erhöht wird. Der Beitrag von OH^--Gruppen zur Verflüssigung wurde bereits im Zusammenhang mit dem Erwerb der Kantenladung durch Gln. (2.1) und (2.2) erwähnt.
Statt für die Tonmineralien soll der chemisch-physikalische Sachverhalt mit den Bildern 2.10a bis c anhand eines Quarzkornes erläutert werden, denn die Ladungserhöhung durch OH^- kann grundsätzlich an allen offenen Bindungen auftreten [9, 22]. In Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche leisten somit auch unplastische Mineralien, wie Quarz oder Feldspat, einen mehr oder weniger großen Beitrag zur Verflüssigung. Bild 2.10a zeigt schematisch die Oberfläche des Quarzkornes nach der Zerkleinerung und die unmittelbar an der Phasengrenze festflüssig angelagerten Ionen. Wird nun durch Einbringen von H^+ der pH-Wert der Suspen-

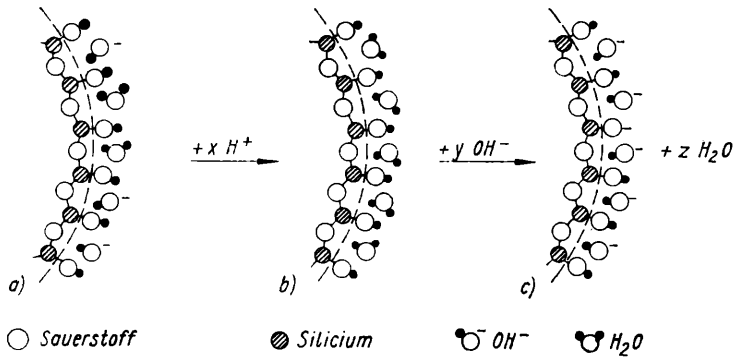


Bild 2.10. *p*H-Abhängigkeit der offenen Bindungen an der Partikeloberfläche von Quarz
a) nach der Zerkleinerung
b) nach Einbringen von H^+
c) nach Einbringen von OH^-

sion verringert, so kommt es zu einem Abbau der negativen Ladung (Bild 2.10b). Führt man einer Suspension OH^--Gruppen zu, so wird die negative Ladung erhöht (Bild 2.10c).
Vorteilhaft sind Hydroxidionen auch dann, wenn die Masse austauschfähige H^+-Ionen besitzt. Diese können durch Zugabe von NaOH ausgetauscht werden, wobei das H^+ sofort zu H_2O gebunden wird. Geschlämmte und mit Calciumhydroxid geflockte Kaoline, wie sie in der Industrie angeliefert werden, enthalten keine austauschbaren H^+-Ionen, so daß der eben genannte Mechanismus in der Praxis kaum Bedeutung hat. Gelegentlich finden sich diese jedoch, wie von *Scharrer* [23] nachgewiesen wurde, bei Osmose-Kaolinen und als Folge der Einwirkung von Huminsäuren bei Rohkaolinen und Tonen.
Eine stabilisierende und gleichzeitig verflüssigende Wirkung zeigen auch solche Substanzen, die selbst eine stark entwickelte Hydrathülle besitzen, z. B. Kieselsäure, Huminsäure und andere hydrophile Kolloide [24]. Bei diesen Kolloiden wirkt weniger die elektrische Aufladung als vielmehr die Umhüllung mit Wassermolekülen (Hydratation) stabilisierend auf die kolloid gelösten Teilchen. Denn hydrophile Kolloide haben ein großes Bestreben, Wassermoleküle zu adsorbieren, welche die Vereinigung der Kolloidteilchen zu gröberen Partikeln verhindern. Solche hydrophile Kolloide sind dementsprechend viel weniger empfindlich gegenüber Elektrolytzusätzen als hydrophobe Kolloide.
Aus diesem Grunde werden reine Sodaschlicker wesentlich leichter destabilisiert als wasserglashaltige Suspensionen, denn bei Zugabe von Natriumsilicatlösung erfolgt nicht nur eine Ausfällung von Calciumsilicat, sondern auch eine Adsorption von Kieselsäure auf der Partikeloberfläche. Diese Kieselsäure übernimmt die Funktion eines Schutzkolloides, indem sie die Tonmineralteilchen mit ihrer Hydrathülle umschließt und damit die Gefahr der Ausflockung weiter verringert.
Kieselsäure kann nach Untersuchungen von *Kvjatkovskaja* und *Oernov* [25] auch durch den Ton oder Kaolin selbst geliefert werden, so daß Unterschiede in der verflüssigenden Wirkung der Elektrolyte in verschiedenen Massen auch durch die Rohstoffe selbst zu erklären sind. Auch aus diesem Grunde erweist es sich für die Praxis als günstig, nicht ein Verflüssigungsmittel (auch als Dispergierungsmittel, Elektrolyt, Peptisator oder Entflocker bezeichnet) allein anzuwenden, sondern eine masseabhängige Kombination (s. Abschnitt 3.1.2.3.).
In engem Zusammenhang mit dem Grad der Verflüssigung und der Stabilität des Schlickers stehen die rheologischen Eigenschaften, auf die im Abschnitt 2.4. näher eingegangen wird.

2.3.2. Bildsamer Zustand keramischer Massen

Zunächst ist es erforderlich, die beiden Begriffe »Bildsamkeit« und »Plastizität« gegeneinander abzugrenzen, die in der keramischen Fachsprache in der Regel synonym verwendet werden. Geht man von der von *Schulze* und *Kästner* [26] gewählten Definition aus, ». . ., daß für die Eigenschaft des strömenden Mediums, bei starker Deformation der Verformung einen geringeren Widerstand entgegenzusetzen als bei kleiner Deformationsgeschwindigkeit, der Begriff *Plastizität*

verwendet wird «, dann kann natürlich die Formbarkeit der keramischen Masse als platissch bezeichnet werden. Die Natur der zwischen den Partikeln herrschenden Bindungskräfte ist aber eine völlig andere als z. B. bei plastisch verformbaren Metallen, bei denen es sich um eine zwischen- oder auch innerkristalline Deformation handelt, so daß es eigentlich angebracht wäre, für keramische Massen ausschließlich den Begriff der *Bildsamkeit* zu verwenden. Da es aber den Anschein hat, daß sich der Keramiker nicht von dem Begriff der Plastizität trennen kann und tatsächlich viele Bezeichnungen, wie plastische Rohstoffe usw., kaum noch aus dem Sprachgebrauch zu entfernen sind, sollen auch im vorliegenden Buch für keramische Massen die Begriffe Bildsamkeit und Plastizität gleichermaßen verwendet werden, obwohl die Plastizität letztlich einen Oberbegriff über viele Möglichkeiten der bleibenden Verformung von Werkstoffen darstellt.

Obwohl die Bildsamkeit der Masse für die keramische Formgebung die zentrale Eigenschaft ist, gibt es weder eine genaue Definition noch eine einheitliche meßtechnische Erfassung für diese Eigenschaft. Nach *Haase* [31] ist die Bildsamkeit das Vermögen einer festen Substanz, auf von außen einwirkende Kräfte mit bleibenden Formänderungen zu reagieren, ohne daß dabei der Zusammenhalt der die Substanz bildenden Teilchen verlorengeht.

Um bildsam formbar zu sein, nehmen die plastischen Rohstoffe eine bestimmte Menge Wasser auf, die ihnen die Fähigkeit verleiht, auf äußere Kräfte durch bleibende Deformation zu reagieren, ohne daß der Zusammenhalt der Teilchen verlorengeht. Bei Wegnahme der Kräfte bleibt die einmal gegebene Form trotz Vorhandenseins der Schwerkraft erhalten. Demnach ist eine Mindestspannung erforderlich, um die Verformung einzuleiten. Die Bildsamkeit ist damit an das Vorhandensein eines »Anlaßwertes« gebunden, der so groß sein muß, daß der geformte Körper den durch die Schwerkraft bewirkten Spannungen ohne weitere Verformung widerstehen kann. Anders ausgedrückt heißt das, daß die keramische Masse den einwirkenden Kräften zunächst einen Widerstand entgegensetzt, ohne sich bleibend zu verformen, sich also elastisch verhält, und erst ab einer bestimmten Größe der Kräfte zu fließen beginnt, wobei das Fließen (Verformung) mit der Scherspannung zunimmt. Dieses Fließen wird im Unterschied zum viskosen Fließen bei *Newton*schen Flüssigkeiten auch als elastisch-plastisches Fließen bezeichnet (zu weiteren rheologischen Begriffen s. Abschnit 2.4.).

Im Gegensatz zur innerkristallinen Deformation der Metalle kann man die bildsame Formänderung als die Summe der relativen Verschiebungen der Teilchen gegeneinander auffassen. Demzufolge wird die Bildsamkeit einer keramischen Masse dann groß sein, wenn diese eine leichte Verschiebbarkeit der Teilchen bei gleichzeitig hohem Assoziationsvermögen derselben gestattet. Dieser Zusammenhang wurde von *Haase* [2] beim Versuch einer Quantifizierung der Bildsamkeit berücksichtigt. Er formulierte entsprechend Gl. (2.13):

$$B \sim \frac{\sigma_z}{\eta} \tag{2.13}$$

B Bildsamkeit
σ_z Zugfestigkeit
η Viskosität.

Aus keramischer Sicht gibt es eine Reihe von Faktoren, die die Bildsamkeit bestimmen. Zu den wesentlichsten gehören:

- die Tonmineralart, die Teilchengröße und Teilchenform,
- die Art und Menge der austauschfähigen Ionen in der elektrischen Doppelschicht,
- die Kapillarkräfte und
- die Anwesenheit von Fremdstoffen, z. B. organische Plastifikatoren.

Der Zustand einer bildsamen keramischen Masse läßt sich in ähnlicher Weise wie bei Gießmassen mit Hilfe des Wechselwirkungsenergie/Abstands-Verhaltens interpretieren, denn grundsätzliche Unterschiede zwischen beiden Massen bestehen eigentlich nur, gleicher Masseversatz vorausgesetzt, im Wasser- und Elektrolytgehalt, bei verflüssigungsmittelhaltigen plastischen Massen sogar ausschließlich im Wassergehalt. Aus dem geringeren Wassergehalt der bildsamen Masse ergeben sich zwangsläufig geringere Partikelabstände und somit eine starke Zunahme der Anziehungsenergie E_D (s. Bild 2.9). Je mehr die Teilchen einander angenähert werden, um so fester werden die aus den *Van-der-Waals*schen Kräften resultierenden interpartikularen Bindungen. Gleichzeitig nimmt die Viskosität der

Masse zu. Die Bildsamkeit ist somit in erster Linie eine massetypische Eigenschaft, die einerseits durch das Ausmaß bzw. die Reichweite der *Van-der-Waals*schen Kräfte (Einfluß auf σ_Z) und andererseits durch die Fähigkeit der Wassereinbindung in die Koagulationsstruktur (Einfluß auf η) bestimmt wird. Es ist deshalb verständlich, daß solche Tonminerale, wie z. B. Montmorillonit, die über viele Wasserstoffbrückenbindungen verfügen und ein hohes innerkristallines Quellvermögen besitzen, den größten Beitrag zur Erhöhung der Bildsamkeit in einer keramischen Masse leisten.

Neben der Tonmineralart sind es im wesentlichen die austauschfähigen Kationen, die darüber entscheiden, ob der Zusammenhalt zwischen den Teilchen locker oder fest ist. Diese Zusammenhänge sind für den Keramikbetrieb, der einen konstanten Masseversatz über einen längeren Zeitraum im Einsatz hat, oftmals von größerer Wichtigkeit als die Einflüsse der Tonmineralart.

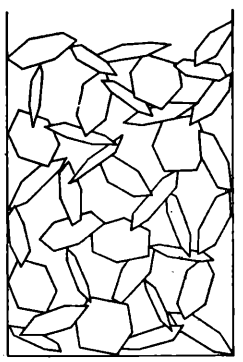


Bild 2.11. Schematische Darstellung der sog. Kartenhausstruktur [27]

In dem natürlichen Zustand, wie z. B. die Kaoline in der keramischen Industrie zur Verarbeitung kommen, sind die Tonmineralien, wie bereits erwähnt, überwiegend mit Calciumionen belegt. Rohstoffe und keramische Massen, die derartige, mit Calcium belegte Tonmineralien enthalten, bilden eine typische Kartenhausstruktur aus (Bild 2.11). Bedingt durch den Aufbau der elektrischen Doppelschicht und die Hydratation der Kationen, kann davon ausgegangen werden, daß auch in einer bildsamen keramischen Masse die Oberflächen der Partikeln mit einer Wasserhülle umgeben sind und sich nicht direkt berühren. Die Ursache für die Ausbildung der Kartenhausstruktur muß deshalb darin gesehen werden, daß die Tonmineralien aufgrund ihrer verschiedenen Doppelschichten parallel und senkrecht zu den Schichtebenen unsymmetrische Kraftfelder und damit eine unterschiedliche Oberflächenladungsdichte besitzen. Insbesondere die *p*H-abhängige negative Kantenladung ist durch die Erdalkalibelegung geschwächt, so daß die interpartikulare Anziehung in erster Linie über die Kanten wirksam wird.

Der Einfluß mehrwertiger Gegenionen auf die zwischenpartikulare Wechselwirkung gestaltet sich bei bildsamen Massen in ähnlicher Weise wie bei den Suspensionen. Mehrwertige Kationen besitzen im Vergleich zu den einwertigen Kationen eine grundsätzlich höhere Bindungsenergie. Liegen die Ladungsschwerpunkte eines Tonminerals weit auseinander, so können Ionen, wie z. B. Ca^{2+}, durchaus zwei negative Ladungen verschiedener Tonmineralien ausgleichen. Eine solche Konstellation begünstigt natürlich die Ausbildung der Kartenhausstruktur und trägt zur Erhöhung der Bildsamkeit bei.

Die Bindung entsprechend dem Kartenhausmodell ist eine schwache Bindung. Sie ist jedoch der Grund für den bereits genannten Anlaß- oder Fließwert. Der Anlaßwert für die Verformung eines plastischen Rohstoffes kann demnach auch als die Spannung definiert werden, die notwendig ist, um die Bindung zwischen den Partikeln für infinitesimal kurze Zeiträume zu lösen und den Rohstoff zum Fließen, d. h. zur Verformung, zu veranlassen.

Bei Natriumbelegung bildet sich auf den Tonmineralteilchen eine breite elektrische Doppelschicht aus, die die Verbindung der einzelnen Kristallplättchen über die Kanten behindert. Es ergibt sich eine ausgeprägte parallele Anordnung der Kristalle und eine leichte Beweglichkeit der Teilchen, was sich positiv auf die Verflüssigung, s. Abschnitt 2.3.1., auswirkt, aber nicht gleichbedeutend mit einer Erhöhung der Bildsamkeit ist, denn für die Bildsamkeit ist, wie bereits erwähnt, neben der Verschiebbarkeit der Teilchen gegeneinander (Scherung) auch ihr Zusammenhalt (Zugfestigkeit) wichtig.

Mit der Ionenbelegung steht der *p*H-Wert der Massen im Zusammenhang. Auf eine Änderung des *p*H-Wertes durch Elektrolytzugabe ist im Zusammenhang mit der Ausbildung der negativen Kantenladung mehrfach verwiesen worden. Somit ist es prinzipiell möglich, die Bildsamkeit über eine Gleichgewichtsverschiebung

der im Wasser gelösten Ionen zu beeinflussen. Zu beachten ist hierbei, daß der *p*H-Wert mit dem Mengenverhältnis plastischer Rohstoff/Wasser wechselt [28]. Der für die Bildsamkeit günstige *p*H-Wert wird gefunden, indem man einen sauren plastischen Rohstoff, z. B. einen huminsäurehaltigen Ton, mit Alkalien bzw. einen alkalischen Rohstoff mit Säure versetzt und dabei bis zum Erreichen des Neutralpunktes in Schritten die Bearbeitbarkeit überprüft. Nach *Barker* [29] sollen sich dadurch Masse und Erzeugnis qualitativ verbessern lassen.

Als weitere Ursache für die Bildsamkeit muß die hohe Oberflächenspannung des Wassers angesehen werden [30]. Dabei spielen die Wasserhüllen der Tonmineralpartikeln und das freie Wasser in den Zwischenräumen eine wichtige Rolle. Infolge der Oberflächenspannung entstehen quasi Häute, die die Masse in gewissem Sinne zusammenhalten. Die hohe Oberflächenspannung des Wassers hat somit hohe Kapillarkräfte zur Folge, die ihrerseits zu einem festeren Zusammenhalt zwischen den Rohstoffpartikeln führen, ohne ihre gegenseitige Verschiebbarkeit wesentlich zu beeinflussen. Damit vergrößert eine hohe Oberflächenspannung die Bildsamkeit keramischer Massen.

Haase [31] hat den Einfluß der Oberflächenspannung nachgebildet, indem er eine Fußballblase mit trockenem Hohenbockaer Sand füllte und anschließend evakuierte. Gleichsam wie eine bildsame Masse ließ sich die Blase kneten und verformen und behielt die ihr gegebene Gestalt. Bei Aufhebung des Vakuums stellte sich der Ursprungszustand wieder ein.

Schwartz [32] konnte den Einfluß der Oberflächenspannung des Wassers nachweisen, indem er Netzmittel zugab, die die Oberflächenspannung verringerten und damit die Bildsamkeit der keramischen Massen verschlechterten.

Das Wasser zwischen den Tonmineralteilchen hat aber gleichzeitig auch die Funktion eines Schmiermittels, wobei die Schichtstruktur der Tonmineralteilchen und ihre gute Spaltbarkeit diesen Effekt begünstigen.

Es ist bekannt, daß die inneren Kräfte, die dem Auseinanderreißen der Tonmineralteilchen und der Trennung der Partikeln voneinander entgegenwirken, zehnmal größer sind als die Kräfte, die ihrer relativen Verschiebung entgegenstehen und die Scherfestigkeit darstellen [33].

Organische Beimengungen, wie Huminsäure, Lignin, oder die Ausbildung von Mikroorganismen infolge des Maukprozesses (längerfristige Lagerung der keramischen Masse in feuchten Räumen) erhöhen die Bildsamkeit ebenfalls [34].

In diesem Zusammenhang soll auch auf eine Erscheinung verwiesen werden, die als »Gedächtnis« der Massen bezeichnet wird. Sie zeigt sich darin, daß nach Beendigung der Wirkung der für die Formgebung angewendeten Kräfte der Rohling nicht nur sofort in gewissen Grenzen elastisch zurückfedert, sondern daß sich sogar nach der Trocknung eine weitere verbleibende Rückverformung bemerkbar macht. Dieses Erinnerungsvermögen der bildsamen keramischen Massen hat besonders *Baudran* [35] sehr ausführlich beschrieben. Diese deutlich meßbare Rückverformung tritt sowohl bei gerollten keramischen Erzeugnissen als auch vor allem bei freigedrehten und stranggepreßten Erzeugnissen auf. *Moore* [36] beschrieb diese Erscheinung für eine Verformung durch Torsion. In diesem Falle zeigte sich, daß eine einmalige Verformung völlig normal abläuft, aber eine weitere Verformung wesentlich einfacher ist, wenn man dem Stück seine ursprüngliche Form wiedergibt.

2.3.3. Trockener Zustand keramischer Massen

Der trockene Zustand keramischer Massen ist nicht an die Anwesenheit plastischer Stoffe gebunden, kann aber auch bei Massen realisiert werden, die gleichzeitig aus plastischen und unplastischen Rohstoffen bestehen. In der Hauptsache wird die keramische Masse jedoch dann in trockener pulvriger Form verwendet, wenn sie keine oder nur verschwindend wenig plastische Bestandteile enthält, wie das in der Konstruktionskeramik, der Funktionskeramik oder bei der Herstellung von Feuerfesterzeugnissen, z. B. bei Silika-, Magnesit- und hochtonerdehaltigen Erzeugnissen, der Fall ist. Trockene Massen werden auch dann eingesetzt, wenn Trockenpreßverfahren eine effektivere Produktion als andere Verfahren gestatten.

Die wichtigsten Anforderungen, die an eine pulvrige bzw. körnige Preßmasse gestellt werden, sind:

- weitgehende Homogenität in ihrer Zusammensetzung,
- gute Rieselfähigkeit und
- gutes Verdichtungsverhalten.

Für die Trockenbruchfestigkeit eines Preßlings ist die Raumerfüllung (Packungsdichte) seiner Bestandteile von ausschlaggebender Bedeutung. Diese ist von der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung des Pulvers (Granulats), vom Preßdruck, vom Körnungsaufbau der Masse und vom Gehalt an fluider Phase abhängig. Entscheidend für die Trockenbruchfestigkeit des Preßlings sind die Bindungen, die infolge des Preßvorganges entstehen.

Während bei der plastischen Formgebung und bei der Gießformgebung stets ein Dispergierungsmittelfilm zwischen den Teilchen erhalten bleibt, kommt es bei der Verdichtung eines trockenen Pulvers (Granulats) zu einem direkten Kontakt der Oberflächen der Rohstoffteilchen.

Bei Metallen erfolgt die Bindung durch die Elektronenwolke, die von einem Metallkristall zum anderen übertreten kann. Bei salzartigen Kristallen sind es die *Coulomb*schen Kräfte zwischen entgegengesetzten Ladungen an den Oberflächen, die zwischen Ionen oder Dipolen wirksam werden. Im Falle homöopolarer Wechselwirkungen rufen die Dispersionskräfte die Bindung hervor.

Die größte Festigkeit wird bei der metallischen Bindung erreicht. Eine feste Bindung bewirken auch die *Coulomb*schen Kräfte zwischen den Ionen. Wesentlich schwächer sind die Kräfte zwischen den Dipolen und am schwächsten die Dispersionskräfte zwischen unpolaren Molekülen. Für die Keramik auf Tonmineralbasis und auch für die Oxidkeramik sind die *Coulomb*schen und *Van-der-Waals*schen Kräfte maßgeblich [37].

Damit die Massen verpreßt werden können, müssen sie, wie oben bereits erwähnt, als rieselfähiges Pulver vorliegen. Für das rieselfähige Pulver existiert ein Wassergehalt (für nichttonmineralhaltige Massen können auch andere Dispergierungsmittel zur Anwendung kommen), bei dem sich die günstigste Packungsdichte für den gepreßten Rohling ergibt. Dieser Wert, der bei tonigen Massen zwischen 4 und 8 % liegt, ist vom vorgegebenen Preßdruck abhängig (s. Abschnitt 3.3.2.3.). In der Praxis werden Wassergehalt und Preßdruck so lange variiert, bis die optimale Verdichtung erzielt ist. Die Abhängigkeit besteht derart, daß mit wachsendem Preßdruck eine geringere Feuchtigkeit notwendig wird. Übersteigt der Wassergehalt den optimalen Wert, wirkt das Wasser wie ein Ausbrennstoff (organisches Material zur Erzielung poröser Keramik), indem es das Volumen des Rohlings vergrößert [38].

Das Trockenpressen tonmineralhaltiger keramischer Massen erfolgt stets in Anwesenheit von Wasser. Ein Pressen bei absoluter Trockenheit ist so gut wie unmöglich, da Kaoline und Tone ohnehin hygroskopisch sind. Der Begriff »trockene« keramische Masse ist somit in der Regel mit Einschränkungen zu behandeln.

Indem das Wasser die Oberfläche der Teilchen benetzt, können die festen Teilchen bei der Preßformgebung leichter aneinander vorbeigleiten und damit die Ordnung der Teilchen verbessern. Durch seine Benetzung und seine innere Kohäsion hält das Wasser die Teilchen zusammen und erhöht die Festigkeit der Masse.

Weitere Abhängigkeiten ergeben sich bei tonmineralhaltigen Preßmassen durch die Biegsamkeit der Tonminerale und die Belegung mit austauschfähigen Kationen. Die gute Trockenbruchfestigkeit von Massen, die größere Mengen Montmorillonit oder Illit enthalten, steht in engem Zusammenhang mit der geringen Dicke der Tonmineralplättchen und ihrer guten Biegsamkeit. Beim Verpressen besitzen diese die Fähigkeit, sich an die körnigen Materialien, z. B. Quarz oder Feldspat, anzuschmiegen, so daß es zu einer innigen Berührung der Oberflächen und damit zu einer festen Verbindung kommt. Besonders stark ist diese Eigenschaft ausgeprägt, wenn bei Anwesenheit austauschbarer Na^+-Ionen die innerkristalline Quellung des Montmorillonits bis zur Auflösung in die einzelnen Schichtpakete führt [37].

Zu den Massen in trockenem Zustand muß man auch die zählen, bei denen durch einen speziellen Aufbereitungsprozeß eine Vielzahl von Individualpartikeln zu größeren Aggregaten vereinigt wird. Insbesondere die Herstellung und Verarbeitung von Sprühgranulat hat in den letzten Jahren eine außerordentliche Bedeutung erlangt (s. Abschnitt 3.3.2.4.).

2.4. Rheologische Grundbegriffe

Bei der Formgebung keramischer Erzeugnisse tritt stets eine Wechselwirkung zwischen Kräften und Deformationen auf, wobei die Deformation mit einem Fließen der Massen gleichzusetzen ist. Bei den sog. Fließkurven, die die Abhängigkeit der Scherrate bzw. des Schergeschwindigkeitsgefälles (auf den Abstand der Partikeln voneinander bezogene Bewegungsgeschwindigkeit der Partikeln gegeneinander) von der wirkenden Scherspannung zum Ausdruck bringen, sind verschiedene Formen zu unterscheiden, die die speziellen Eigenschaften der keramischen Masse zum Ausdruck bringen. Die Rheologie befaßt sich mit der wissenschaftlichen Erforschung der Verformung und der Fließeigenschaften der Materie, wobei im vorliegenden Fall vor allem die Fließeigenschaften der bildsamen keramischen Massen und der Schlicker interessieren. Vor der Erläuterung spezieller Fließkurven soll auf den Begriff der Viskosität eingegangen werden.

2.4.1. Viskosität

Unter Viskosität versteht man den Fließwiderstand rheologischer Stoffe. Der Viskositätskoeffizient ist ein Maß für den Widerstand dieser Stoffe gegen Scher- und Winkeldeformation [39]. Die genaue Definition der Viskosität geht auf das Fließmodell von *Newton* zurück. Danach werden zwei Schichten betrachtet, zwischen denen sich eine Flüssigkeitslamelle mit der Dicke dn befindet. Infolge der angreifenden Scherspannung τ wird die obere Schicht bewegt, während die untere Schicht in Ruhe bleibt. Zwischen beiden Schichten entsteht eine Geschwindigkeitsdifferenz dv. Das Verhältnis von Geschwindigkeitsdifferenz dv zur Lamellendicke dn ist die Scherrate bzw. das Schergeschwindigkeitsgefälle D. Handelt es sich um eine rein *Newton*sche Flüssigkeit, so ist D der angreifenden Scherspannung τ proportional. Durch Einführung des Proportionalitätsfaktors η entsteht die Gl. (2.14):

$$\tau = \eta \frac{dv}{dn} = \eta D$$

oder

$$\eta = \frac{\tau}{D} \tag{2.14}$$

η Viskositätskoeffizient oder Viskosität (in Pa s).
τ Scherspannung (in Pa)
D Schergeschwindigkeitsgefälle (in s^{-1}).

Die Viskosität ist damit auf ein ganz bestimmtes Kraft/Verformungs-Verhältnis festgelegt, in das der Zeitfaktor – die Dauer der Verformung – einbezogen ist [40].

2.4.2. Fließkurven von keramischen Massen

Keramische Suspensionen und bildsame Massen zeigen keine Proportionalität zwischen Spannung und Scherrate wie rein *Newton*sche Flüssigkeiten.
Die Fließeigenschaften von Tonmineral/Wasser-Gemischen lassen sich in der Form charakteristischer Fließkurven darstellen, wenn die Scherrate in Abhängigkeit von der Scherspannung aufgetragen wird. Einschränkend muß hierzu jedoch bemerkt werden, daß diese Darstellung nicht immer die Fließvorgänge richtig wiedergibt, weil vorausgesetzt wurde, daß die Beziehung zwischen Scherrate und Scherspannung zeitunabhängig ist.
Sieht man von diesem speziellen Fall ab, so kann man nach *Moore* [36] im wesentlichen vier typische Kurvenverläufe unterscheiden (Bild 2.12):

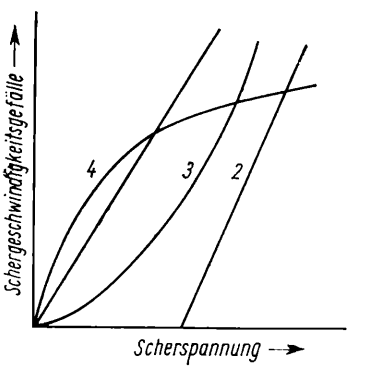


Bild 2.12. Fließkurven nach *Moore* [36]
1 *Newton*sches Fließen
2 *Bingham*- Fließen
3 pseudoplastisches Fließen
4 dilatantes Fließen

- Kurve *1* auf Bild 2.12 zeigt das rein *Newton*sche Fließen. Dieses Fließen, bei dem die Scherrate eine lineare Funktion der Scherspannung ist, gilt für kolloide Systeme nur dann, wenn es sich um eine echte Flüssigkeit, also ein Sol, handelt.
- Kurve *2* gibt das Verhalten eines *Bingham*-Körpers wieder. Zur Einleitung des Fließvorganges ist zunächst eine bestimmte Scherspannung erforderlich, die, wie bereits erwähnt, als Fließgrenze oder Anlaßwert bezeichnet wird. Für die Viskosität η^* ergibt sich nach Gl. (2.15):

$$\eta^* = \frac{\tau - \tau_0}{D} \tag{2.15}$$

τ_0 Anlaßwert
η^* plastische Viskosität.

Ein kolloides System, welches diese Bedingung erfüllt, wird auch als Gel bezeichnet.

- Kurve *3* ist für das *pseudoplastische* Fließen charakteristisch und stellt eine für die Strukturviskosität typische rheologische Kurvenform dar. Das Fließverhalten pseudoplastischer Systeme ist dadurch gekennzeichnet, daß die Scherrate mit zunehmender Scherspannung progressiv ansteigt, d. h., daß eine dem Kurvenanstieg im Koordinatenursprung folgende *Newton*-Kurve zwischen Kurve *3* und der Abszisse liegen würde. Die Abhängigkeit $D(\tau)$ entspricht einer Funktion höherer Ordnung der Art $D \sim \tau^n$ mit $n > 1$. Ist bei einer Kurve entsprechend Typ *3* auf Bild 2.12 auch noch der Anlaßwert ausgeprägt sichtbar, so daß eine Verbindung des Fließtyps nach Kurve *2* und Kurve *3* auftritt, dann liegt nach *Schulze* und *Kästner* [26] *quasiplastisches* Fließen vor (s. Bild 2.13 und Abschnitt 3.2.1.).

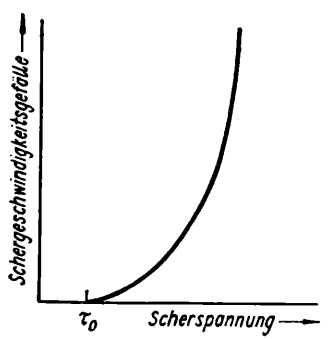


Bild 2.13. Fließkurve für quasiplastisches Verhalten [26]

- In Kurve *4* auf Bild 2.12 ist ebenfalls eine typische Form der Strukturviskosität, das *dilatante* Verhalten, veranschaulicht. Die Scherrate nimmt bei dilatantem Verhalten mit zunehmender Scherspannung degressiv ab. Die dazugehörige *Newton*sche Kurve würde also oberhalb der Kurve *4* verlaufen und die Abhängigkeit $D(\tau)$ einer Funktion $D \sim \tau^n$ mit $n < 1$ entsprechen.

Keramische Schlicker zeigen *strukturviskoses*, d. h. von den Kurven *1* und *2* abweichendes Fließverhalten, das mit der *Ostwald*schen Beziehung

$$D = k\,\tau^n \tag{2.16}$$

hinreichend charakterisiert werden kann.
Der Exponent n ist ein Maß für die Strukturviskosität des Schlickers und läßt sich für einen ausgewählten Scherratebereich als Tangens des Anstiegwinkels der Fließkurve nach Gl. (2.17) berechnen [41, 42].

$$n = \tan\alpha = \frac{\log D_1 - \log D_0}{\log \tau_1 - \log \tau_0} \tag{2.17}$$

Die Zahl n kennzeichnet den Grad der Verflüssigung einer Gießmasse. Die Größe von n ist von den elektrostatischen Verhältnissen in der Suspension abhängig. Unverflüssigte und unterverflüssigte Schlicker zeigen aufgrund der Tendenz zur Ausbildung der Kartenhausstruktur pseudoplastisches Fließverhalten ($n > 1$). Mit zunehmender Verflüssigung nähern sich die Kurven dem *Newton*schen Fließverhalten. Bei der Herstellung von Gießmassen strebt man den Fall $n \approx 1$ an, wobei eine geringe Rest-Pseudoplastizität, wie in Abschnitt 3.1.2.2. noch gezeigt wird, von Vorteil ist. Mit weiterer Elektrolytzugabe, d. h. über das Viskositätsminimum (s. Bild 3.1) hinaus, tritt insbesondere bei hohen Suspensionsdichten der Fall $n < 1$ ein. Bei solchen Schlickern ist die Kartenhausstruktur infolge des *p*H-Wertes im wesentlichen aufgehoben. Aufgrund des hohen Elektrolytgehaltes kommt es bereits zur Kompression der elektrischen Doppelschicht und damit zu einer Abnahme der elektrostatischen Energie der Partikeln. Solche Schlicker tendieren zur Sedimentation und verhalten sich dilatant. Die physikalische Ursache des dilatanten Verhaltens muß insbesondere darin gesehen werden, daß sich die

großen anisometrischen Rohstoffpartikeln bei einer hohen Scherrate zu langsam entsprechend dem Schergeschwindigkeitsgefälle ausrichten, so daß sich die Teilchen gegenseitig behindern und die Scherung aufgehalten wird.

In engem Zusammenhang zu den bisher erläuterten rheologischen Begriffen stehen die Eigenschaften *Thixotropie* und *Rheopexie*. Die Thixotropie wird häufig mit der Pseudoplastizität und die Rheopexie mit der Dilatanz verwechselt.

Pseudoplastizität mit $n > 1$ bedeutet höhere Viskosität bei niedrigerem Schergeschwindigkeitsgefälle und geringeres Schergeschwindigkeitsgefälle bei niedrigerer Schubspannung [42].

Der Begriff Thixotropie geht auf *Peterfi* [43] zurück und bedeutet soviel wie Gestaltumwandlung eines Stoffes durch Berührung. Gemeint ist die isotherme und reversible Gel/Sol-Umwandlung oder – nach *Brückner* [44] – die isotherme, völlig reversible Strukturtransformation, bei der das Ausmaß des Strukturabbaues von der mechanischen Energie abhängt, die das strukturviskose System aufnimmt.

Die Thixotropie ist im Gegensatz zur Pseudoplastizität eine zeitabhängige Eigenschaft und bedeutet steigende Viskosität im bewegungslosen Zustand [42].

Bei rheologischen Messungen äußert sich die Thixotropie in der Weise, daß in Abhängigkeit von der Standzeit (Beharrungszustand) eine Verschiebung des Anlaßwertes in Richtung zu höheren Schubspannungswerten erfolgt. Des weiteren äußert sich die Thixotropie in der Hysteresefläche, die bei rotationsviskosimetrischen Messungen (s. Abschnitte 2.5.2. und 3.1.2.2.) von der Auf- und Abkurve eingeschlossen wird.

Die Rheopexie ist die gegenteilige, zeitabhängige Eigenschaft, die im Bewegungszustand über die Zeit zu höherer Viskosität führt. Im Gegensatz zur Thixotropie hat für Rheopexie, gleiche D-Werte vorausgesetzt, bei Spannungs/Scherrate-Kurven die Abkurve größere τ-Werte als die Aufkurve.

Das Fließverhalten keramischer Schlicker wird auch durch den Feststoffgehalt und die Partikelgeometrie beeinflußt. Mit steigender Feststoffkonzentration nimmt die Viskosität der Suspension zu. Den Zusammenhang zwischen der Viskositätszunahme und der Feststoffkonzentration gibt die *Einstein*-Formel, Gl. (2.18), an [45]:

$$\eta = \eta_0 (1 + 2{,}5\, c) \tag{2.18}$$

η_0 Viskosität des Dispergierungsmittels
c Konzentration der festen Phase im Dispergierungsmittel.

Diese Beziehung gilt für Suspensionen mit kugligen Teilchen und geringer Feststoffkonzentration.

Bei hohen Feststoffgehalten soll die *Einstein*-Beziehung in Gl. (2.19) übergehen [45].

$$\eta = \eta_0 \left(1 + \frac{1{,}25c}{1 - \frac{c}{0{,}74}}\right)^2 \tag{2.19}$$

Der Einfluß der Teilchengestalt ist im wesentlichen durch ihre Anisometrie begründet [45]. Infolge rotierender Bewegungen in der Suspension täuschen sie bei der Messung eine höhere Viskosität vor.

Für solche Suspensionen, bei denen die Fließkurve keinen linearen Zusammenhang zwischen Scherrate und Scherspannung ergibt, kann man auch keinen konstanten Viskositätswert angeben. Deshalb wird vereinbarungsgemäß von einem Punkt der Kurve, der durch eine bestimmte Scherrate definiert ist, eine Gerade durch den Koordinatenursprung gezogen und deren Anstieg ermittelt (s. Bild 3.3, S. 41). Der Wert, der sich als Quotient aus der Scherspannung und der Scherrate ergibt, wird nach *Green* [46] als *plastische Viskosität* bezeichnet und ist eindeutig von den Prüfbedingungen abhängig.

2.5. Meßtechnische Erfassung der für die Formgebung wichtigen Eigenschaften

2.5.1. Feuchtigkeitsmeßverfahren

Die Ermittlung des Wassergehaltes keramischer Schlicker und bildsamer Massen ist für die keramische Formgebung eine Voraussetzung von eminenter Wichtigkeit. Unter- oder Überschreitungen des technologisch vorgeschriebenen Wassergehaltes führen immer wieder zu Formgebungsfehlern und damit zu Ausschuß und Minderwahl in der Produktion. Die wachsende Bedeutung der Feuchtigkeitsmessung, vor allem bedingt durch den zunehmenden Automatisierungsgrad, ist auch der Grund für die Vielzahl

an Meßgeräten und Vorrichtungen, die in den letzten Jahren entwickelt und zum überwiegenden Teil im Bereich Masseaufbereitung eingesetzt wurden, da dort der Wassergehalt eingestellt wird.
Welches Verfahren zur Anwendung kommt, wird im wesentlichen von den spezifischen Produktionsbedingungen abhängen. Nach *Lück* [47] kann man die Feuchtemeßverfahren in drei Gruppen einteilen:

- Trennung des Wassers von der Trägersubstanz (Gewichtsverlust durch Trocknung, Adsorption durch hygroskopische oder wasserumsetzende Stoffe usw.),
- Ausnutzung bestimmter Eigenschaften des Wassers (Dipolcharakter, Neutronenbremsung, Dielektrizitätskonstante, Ultrarot-Absorption),
- Messung der Wirkung des Wassergehaltes (Änderung von Masse, Volumen, elektrischer Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, spezifischer Wärme, optischen Eigenschaften, Freigabe von Lösungswärmen, Siede- und Taupunkt usw.).

Zu den wichtigsten Feuchtebestimmungsmethoden und -meßprinzipien [48, 49], die in der keramischen Industrie zum Einsatz kommen, gehören die

- Dörr/Wäge-Methode,
- Calciumcarbid-Methode,
- Infrarotmethode,
- Wärmeleitfähigkeitsmessung,
- Neutronenmethode,
- Mikrowellenabsorption,
- Kerninduktionsmethode,
- elektrische Leitfähigkeitsmessung,
- dielektrische Messung,
- kernphysikalische Verfahren mit β- und γ-Strahlen.

Von den Laborbestimmungsmethoden ist die Dörr/Wäge-Methode am weitesten verbreitet.
Zu den Feuchtemeßverfahren, die sich für Automatisierungszwecke insbesondere in der Masseaufbereitung und damit zur Regelung der Massekonstanz eignen, gehören die

- Neutronenmethode,
- nukleare Feuchtemessung bzw. Dichtemessung,
- Messung der elektrischen Leitfähigkeit.

Feuchtemeßverfahren direkt im Formgebungsprozeß zur Steuerung desselben haben sich bisher nicht eingeführt.

2.5.2. Meßverfahren zur Beurteilung der Fließeigenschaften keramischer Suspensionen

Die zunehmende Mechanisierung und Automatisierung des Schlickertransportes und der Formgebung durch Gießen stellen immer höhere Anforderungen an die Konstanz der Eigenschaften der Gießmasse. Vor allem die Parameter Wassergehalt, Verflüssigungsmittelzusatz und Schlickertemperatur beeinflussen neben der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der Masse und der Härte des Wassers die Verarbeitungseigenschaften des Schlickers. Die daraus resultierende Vielzahl von Einflußgrößen kompliziert die Beurteilung des rheologischen Verhaltens und erschwert eine exakte meßtechnische Erfassung sowie Auswertung der Schlickereigenschaften.
Für die Beurteilung des Fließverhaltens ist die Viskosität die zentrale Eigenschaft, wobei es richtiger wäre, von der Strukturviskosität und der plastischen Viskosität zu sprechen, s. Abschnitt 2.4.2., da in sie

- die Feststoffkonzentration,
- die Art und Menge an Verflüssigungsmitteln und
- verschiedenste Masseparameter

eingehen. In der keramischen Praxis haben sich folgende Meßverfahren zur Beurteilung der Viskosität durchgesetzt:

- Auslaufviskosimeter,
- Rotationsviskosimeter,
- Viskosimeter mit Schwingungsdämpfung,
- Ultraschallviskosimeter.

Wegen der Häufigkeit der Anwendung der Auslauf- und der Rotationsviskosimeter sollen nur für diese die Meßprinzipien kurz erläutert werden.

Auslaufviskosimeter

Auslaufviskosimeter sind wegen ihrer einfachen Handhabung in nahezu allen keramischen Betrieben verbreitet. Das Messen der Auslaufzeit

ist eine schnelle Meßmethode, die für die Betriebskontrolle zu vergleichenden Untersuchungen durchaus geeignet ist, wenn gleichzeitig andere Parameter, wie z. B. die Litermasse, die Scherbendicke bzw. das Scherbenansatzgewicht, die Temperatur des Schlickers, der Thixotropiekoeffizient (s. unten) und die Abstumpfzeit (der frische Scherben verliert nach einer gegebenen Zeit seinen Glanz), gemessen werden.

Das Prinzip dieser Geräte besteht in der Messung der Auslaufzeit eines vorgegebenen Schlikkervolumens aus einem geeichten Rohr unter festgelegten Bedingungen oder aus einem Behälter mit definierten Abmessungen und festgelegter Geometrie der Ausflußöffnung (Düse).

Die Nachteile, die mit der Messung des Auslaufvorganges verbunden sind, resultieren vor allem aus dem strukturviskosen (s. Abschnitt 2.4.2.) und zeitabhängigen Fließverhalten keramischer Schlicker. Die Angabe der Auslaufzeit ohne entsprechende Werte für die Schubspannung τ und das Schergeschwindigkeitsgefälle D reicht nicht aus, um das Fließverhalten keramischer Schlikker wissenschaftlich exakt und ausreichend zu beschreiben. Ein weiterer Mangel besteht darin, daß die Untersuchungen in der betrieblichen Praxis nicht bei definierter Schlickertemperatur durchgeführt werden.

Auslaufviskosimeter sind ausgesprochene Geräte für die Produktionskontrolle im Labor und für Automatisierungsaufgaben wenig geeignet. Von den Geräten, die in Labors zum Einsatz kommen, sind das Auslaufviskosimeter, der Auslaufbecher (Bild 2.14), das Viskosimeter nach *Kohl* [50] sowie die Viskosimeter nach *Lehmann* und *Czech* [50] am gebräuchlichsten.

Für die Messung der Auslaufzeit mit dem Becher wird dieser bis zum Rand mit Schlicker gefüllt und die Zeit gemessen, die zum Auslaufen von 50 ml Schlicker benötigt wird. Zur Beurteilung der Thixotropie wird eine weitere Messung nach einer Standzeit des Schlickers von 15 oder30 min im Auslaufbecher durchge führt. Die Festlegung der Standzeit richtet sich in der Regel nach den technologischen Gegebenheiten des Werkes.

Zur Beurteilung der Thixotropie wird der Thixotropiekoeffizient entsprechend Gl. (2.20) definiert:

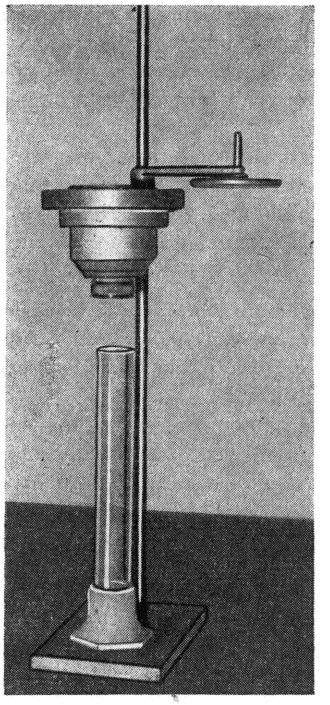


Bild 2.14. Auslaufbecher

$$Th = \frac{t_a}{t_b} \tag{2.20}$$

Th Thixotropiekoeffizient
t_a Auslaufzeit »sofort« (in s)
t_b Auslaufzeit nach der vereinbarten Standzeit (in s).

Bei $Th = 1$ liegt keine Thixotropie vor.

Gebräuchlich ist auch die Thixotropiezahl TC [51] gemäß Gl. (2.21):

$$TC = \frac{t_b - t_a}{t_a} 100. \tag{2.21}$$

Rotationsviskosimeter

Für eine exakte Beurteilung des Fließverhaltens keramischer Schlicker sind Rotationsviskosimeter besser geeignet als Auslaufviskosimeter. Der Aufwand für eine Messung ist aber größer. Einem keramischen Labor sollten deshalb beide Geräte zur Verfügung stehen, Auslaufviskosimeter für die tägliche Produktionskontrolle und Rotationsviskosimeter für eine definierte Beurteilung der Massen, z. B. bei Versatzänderung. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß das Meß*prinzip* von Rotationsviskosimetern zur Automatisie-

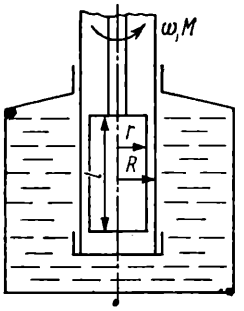


Bild 2.15. Prinzip des *Couette*zylinder-Meßsystems für das Rotationsviskosimeter »Rheotest«

rung der Viskositätsmessung im Produktionsbetrieb geeignet ist. Für Labormessungen hat sich das Rotationsviskosimeter »Rheotest« des VEB MLW Prüfgeräte-Werk Medingen gut bewährt [52].

Dieses Gerät ist als Doppelsystemgerät entwickelt worden und kann wahlweise mit einer *Couette*zylinder-Meßeinrichtung [52] oder mit einer Kegel/Platte-Einrichtung betrieben werden. Bei der *Couette*zylinder-Meßeinrichtung (Bild 2.15) befindet sich das Meßgut im Ringspalt eines koaxialen Zylindersystems. Es gelten die Gln. (2.22) bis (2.24):

$$\tau_r = \frac{M}{2\pi l r^2} \tag{2.22}$$

$$D_r = \frac{2\omega R^2}{R^2 - r^2} \tag{2.23}$$

$$\eta = \frac{\tau_r}{D_r} \tag{2.24}$$

τ_r Schubspannung (in Pa)
M Drehmoment (in N m)
l Länge des inneren Zylinders (in m)
r Radius des inneren Zylinders (in m)
D_r Schergeschwindigkeitsgefälle (in s^{-1})
ω Winkelgeschwindigkeit (in s^{-1})
R Radius des äußeren Zylinders (in m)
η Viskosität (in Pa s).

Bei der Kegel/Platte-Einrichtung befindet sich die zu messende Substanz im Keilspalt zwischen einer planen, feststehenden Platte und einem mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω rotierenden Kegel vom Radius R (Bild 2.16). Es bestehen die Beziehungen (2.25), (2.26) und (2.14):

$$\tau = \frac{3M}{2\pi R^3} \tag{2.25}$$

$$D = \frac{\omega}{\tan\varphi} \tag{2.26}$$

$$\eta = \frac{\tau}{D} \tag{2.14}$$

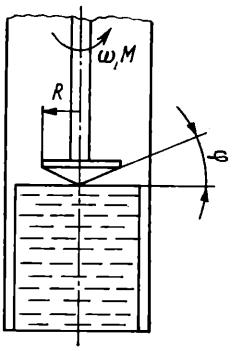


Bild 2.16. Prinzip der Kegel/Platte-Meßeinrichtung für das Rotationsviskosimeter »Rheotest«

τ Schubspannung (in Pa)
M Drehmoment (in N m)
R Kegelradius (in m)
D Schergeschwindigkeitsgefälle (in s^{-1})
ω Winkelgeschwindigkeit (in s^{-1})
φ Spaltwinkel des Kegel/Platte-Systems
η Viskosität (in Pa s).

2.5.3. Beurteilung und meßtechnische Erfassung der Bildsamkeit

Da es, wie in Abschnitt 2.3.2. gesagt, für die Bildsamkeit keine exakte Definition gibt, folgt daraus, daß es auch kein eindeutiges Meßverfahren zur Quantifizierung der Bildsamkeit gibt. Eine verbale Beschreibung der Bildsamkeit bzw. die Bezeichnung »mager« für eine wenig bildsame oder »fett« für eine hochbildsame keramische Masse sind keine Basis für die Erfassung der Formgebungseigenschaften und schon gar nicht für eine Automatisierung des Formgebungsprozesses, so daß immer wieder versucht wurde, die Bildsamkeit zu definieren und sie auf dieser Basis zu messen. Dabei wird in der Literatur meist von Verfahren zur Plastizitätsmessung gesprochen. Wir schließen uns hier den von den Autoren selbst gewählten Begriffen an. Die bekanntesten Methoden zur Ermittlung der Bildsamkeit sind:

- Bildsamkeit nach *Haase* [2],
- Plastizitätszahlen nach *Rieke*, *Attenberg* und *Casagrande* [53],
- *Enslin*wert [54, 55],
- Plastizität nach *Pfefferkorn* [56],
- Plastizität nach *Astbury* [57],
- Plastizität nach *Linseis* [58, 59],
- Penetrometerwert [60],
- Fließdruckmessung [61],

- Stromaufnahme [61],
- Kraftmessung über Dehnmeßstreifen [62].

Die meisten Methoden legen die Bildsamkeitsdefinition nach *Haase* [2], s. Gl. (2.13), zugrunde, der die Ursache für die Bildsamkeit einerseits in der Binde- bzw. Zerreißfestigkeit zwischen den Teilchen und andererseits in ihrer Verschiebbarkeit gegeneinander sieht, denn jede Formänderung ist auf eine Gleitbewegung der Tonmineralteilchen zurückzuführen. Eine Masse ist deshalb um so bildsamer, je geringer die Kräfte sind, die bei gleichzeitigem Zusammenhalt der Partikeln für eine Verformung durch Verschiebung erforderlich sind.

Andere Verfahren, wie die Enslinwertbestimmung oder die Plastizität nach *Astbury*, beruhen auf der Messung des Quellvermögens der Tonminerale bzw. der Ermittlung von Torsionshysteresen. Mittels Torsionswechsellastuntersuchungen können sehr gute Aussagen über das Verformungsverhalten beliebiger Werkstoffe getroffen werden, da bei diesen Untersuchungen gleichzeitig die elastische und die bleibende Verformung erfaßt werden. *Hennicke* [63] hat eine detaillierte Übersicht gegeben, wie die verschiedenen Formen der Hysterese-Kurven zu erklären sind (s. Bild 2.17). Daraus kann man entnehmen, daß sich für bildsame keramische Massen in den Hysterese-Kurven sowohl die stets vorhandene elastische Verformung als auch die bleibende Verformung und der Anlaßwert nachweisen lassen.

Für betriebliche Untersuchungen hat sich aufgrund der leichten Handhabbarkeit und der Möglichkeit, sehr schnell zu einer Aussage zu kommen, der Nadelfallversuch durchgesetzt, wie er z. B. mit dem Penetrometer durchgeführt wird. So hat sich das Penetrometer AP 4/2 [60] in der keramischen Praxis der DDR bewährt.

Die an bildsamen Massen ermittelten Penetrometer-Werte sind Relativwerte. Die Eindringtiefe der Penetrometernadel ist sowohl vom Anlaßwert als auch von der plastischen Viskosität der Masse abhängig. Für die Beurteilung gleichartiger keramischer Massen und für Messungen im Rahmen des Betriebskontrollsystems hat sich deshalb die gleichzeitige Bestimmung von Feuchte und Penetrationsgrad eingeführt. Bild 2.18 zeigt in allgemeiner Form die Abhängigkeit von Massefeuchte und Penetrationsgrad für

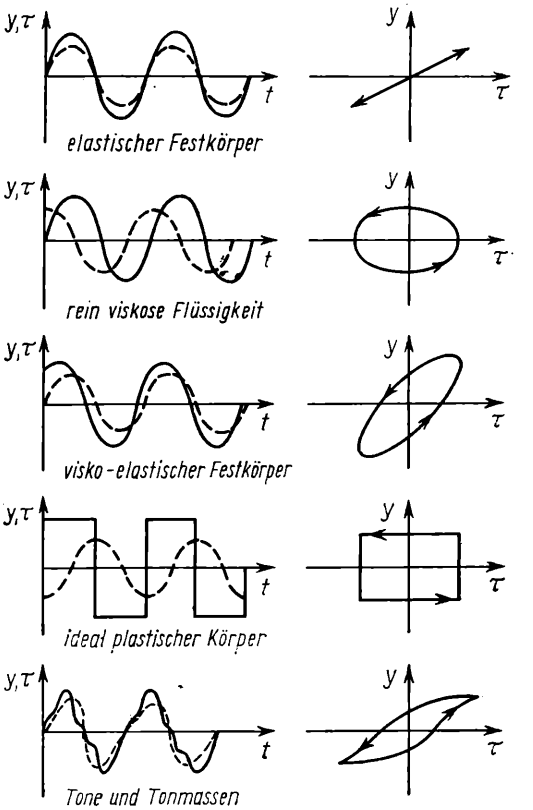


Bild 2.17. Stoffverhalten bei zyklischer Verformung [63]
—— Spannung τ
--- Verformung γ

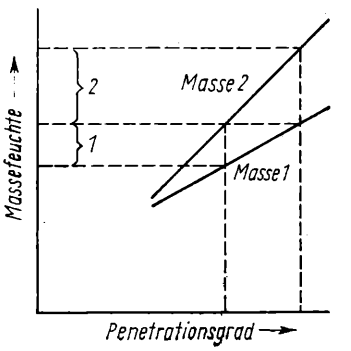


Bild 2.18. Beurteilung zweier Massen durch Ermittlung des Penetrationsgrades und der Feuchte

zwei Massen im Verarbeitungsintervall. Wird an der Masse nichts Grundsätzliches geändert, dann kann das durch den Penetrationsgrad vorgegebene Verarbeitungsintervall durch die Einstellung der Feuchtigkeit realisiert werden.
Da die Masse, die die größeren Wasseranteile binden kann, auch die bildsamere ist, gilt, daß die Bildsamkeit der Masse zunimmt, je steiler der Kurvenverlauf entsprechend Bild 2.18 ist.
In der Porzellanindustrie werden die durch Strangziehen hergestellten Massehubel in der Regel nicht sofort auf den Formgebungsanlagen verarbeitet. Bis zum Ausformen tritt ein Feuchtigkeitsverlust ein, der unter ungünstigen Bedingungen so groß sein kann, daß die Masse außerhalb der vorgegebenen Verarbeitungstoleranz zu liegen kommt und Formgebungsfehler die Folge sind. Die Masse *2* in Bild 2.18 wird im Vergleich zur Masse *1* nicht nur die bildsamere sein, sondern auch die produktionssicherere (Toleranzbereiche *1* und *2*).
Die Steilheit der Kurve im Verarbeitungsbereich steht bei gleichartigen Massen in engem Zusammenhang mit der Kationenbelegung der Tonminerale. Verflüssigungsmittelhaltige Drehmassen mit ausgesprochener Na^+-Belegung zeigen einen flachen Kurvenverlauf und einen insgesamt niedrigeren Feuchtegehalt als verflüssigungsmittelfreie Massen mit Ca^{2+}-Belegung. Daraus resultiert auch die Notwendigkeit, den Anmachwassergehalt von Massen mit flacher Kennlinie genauestens einzustellen, wenn Produktionsstörungen bei der Formgebung vermieden werden sollen. Unter Anmachwasser versteht man dabei die Wassermenge, die zugeführt werden muß, um die Masse in die für die Formgebung gewünschte Konsistenz zu bringen.
Für Automatisierungszwecke sind Bildsamkeitsmeßverfahren geeignet, die nach dem Prinzip der Stromaufnahme oder der Fließdruckmessung arbeiten.
Die Messung der Stromaufnahme von Formgebungsmaschinen [61] wird mit Erfolg eingesetzt, wo die Durchsatzleistung der Anlage sehr konstant ist und die Anforderungen an die Regelgenauigkeit nicht allzu hoch sind. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Stromaufnahme der Maschine und der Bildsamkeit der keramischen Masse. Das Verfahren wird hauptsächlich in der Grobkeramik eingesetzt.
Die Fließdruckmessung im Preßkopf von Strangpressen (s. Abschnitt 4.2.1.) ist eines der zweckmäßigsten Bildsamkeitsmeßverfahren, das sich vor allem durch eine geringe Abhängigkeit von der Strangvorschubgeschwindigkeit und von Störgrößen auszeichnet. In der Ziegelindustrie hat sich dieses Verfahren bereits gut bewährt und ist auch für andere Massen, z. B. Steatit, erfolgreich erprobt worden [61].
In jüngster Zeit wird zunehmend die moderne Sensortechnik auch für die Erfassung der Bildsamkeit genutzt. *Hennicke* beschreibt in [62], wie man sie an Rollermaschinen unter Einsatz von Dehnmeßstreifen und moderner Rechentechnik bestimmt. Die Ergebnisse werden für die Steuerung der Rollerformgebung genutzt (s. auch Abschnitt 4.2.2.1.).

2.5.4. Korngrößenanalysen

So wie die Messung der Feuchtigkeit für sämtliche Formgebungsverfahren Bedeutung besitzt, ist auch für alle Formgebungsverfahren die Kenntnis der Korngrößen der eingesetzten Rohstoffkomponenten äußerst wichtig. Dabei komm t es nicht nur auf die Bestimmung einer mittleren Korngröße oder eines Siebrückstandes der einzelnen Rohstoffe an, sondern auf die Bestimmung des Korngrößenspektrums, auf die Kenntnis der Kornform und auf Aussagen zur Homogenität der Mischung der Rohstoffe.
In der Prüf- und Kontrolltechnik der Keramik haben die Korngrößenbestimmungen mittels Prüfsiebung und Sedimentationsanalysen eine breite Anwendung gefunden.
Die Auswertung von Korngrößenanalysen erfolgt am einfachsten im RRS-Körnungsnetz. Dieser Darstellung liegt die von *Rosin, Rammler, Sperling* und *Bennett* [64] aufgestellte Exponentialfunktion zugrunde:

$$R = 100\, e^{-\left(\frac{d}{d'}\right)^n} \qquad (2.27)$$

R Rückstand auf dem Prüfsieb für die Korngröße d (in %)
d Korngröße (in mm)
d' Korngröße des Gutes, für das der Rückstand $R = 36{,}8\,\%$, d. h. 100/e, beträgt (in mm)
n Konstante, die vom Material und dem Körnungsbereich des zerkleinerten Gutes abhängt.

Für die genaue Darstellung einer solchen Funktion ist eine sehr umfangreiche Korngrößenanalyse erforderlich. Um sich die Arbeit zu erleichtern, kann man durch doppeltes Logarithmieren der Gl. (2.27) das Körnungsband als Gerade darstellen. Bei Verwendung eines doppelt logarithmisch geteilten Koordinatenpapiers erhält man das Körnungsband direkt als Gerade. Der Vorteil dieser Darstellung ist, daß mit wenigen Meßwerten, im Extremfall mit zwei Punkten oder mit einem Punkt und dem Anstieg der Geraden, die Körnungslinie eingezeichnet werden kann.

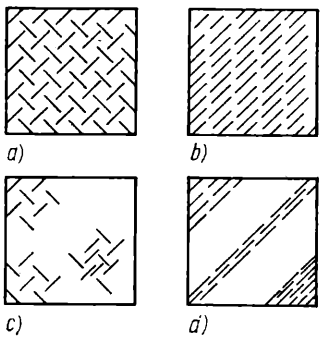


Bild 2.19. Grundtypen der Textur [66]
a) isotrop/homogen – ungerichtete Textur
b) anisotrop/homogen – gerichtete Textur
c) isotrop/inhomogen – ungerichtete Textur
d) anisotrop/inhomogen – gerichtete Textur

2.6. Struktur und Textur von keramischen Massen und Rohlingen

Es ist notwendig, die Begriffe Struktur, Textur und Gefüge näher zu erläutern, da in der Literatur und im keramischen Sprachgebrauch diese Begriffe nicht einheitlich verwendet werden.
Unter Gefüge ist die Art und das Zusammentreten der einzelnen Bestandteile zu verstehen, also die Beziehung zwischen Form und Anordnung derselben einschließlich der zwischen den gefügten Teilen, d. h. den Rohstoffpartikeln, liegenden Zwischenräume.
Das Gefüge läßt sich in Struktur und Textur unterteilen. Nach *Erdmannsdörfer* [65] ist die *Struktur* die Art des Aufbaues aus den Einzelkomponenten und die *Textur* ein Gefügekomplex höherer Ordnung, gegeben durch die Anordnung von Gefügegruppen.
Die Textur beinhaltet nach *Haage* [66]

- die Orientierung der Gefügebestandteile (Richtungsgefüge, isotrope und anisotrope Texturen),
- die Verteilung der Gefügebestandteile (Verteilungsgefüge, homogene und inhomogene Texturen),
- den Grad der Raumerfüllung (kompakte bis poröse Texturen).

Abgesehen vom Grad der Raumerfüllung, werden 4 Grundtypen der Textur, wie Bild 2.19 zeigt, unterschieden. Mit Hilfe dieser Texturgrundtypen lassen sich Formgebungsvorgang und Erzeugnis beurteilen. Aber erst das Gefüge als Ganzes gibt über die Wechselwirkung zwischen keramischer Masse und Formgebungsprozeß Auskunft. Umgekehrt ermöglicht das Erkennen dieser Wechselwirkung die zielgerichtete Beeinflussung des Gefüges und damit des keramischen Erzeugnisses.
Wird in der keramischen Praxis von Textur gesprochen, so sind damit Inhomogenitäten im Gefügeaufbau des Formlings oder Erzeugnisses gemeint, die eine Verletzung des Homogenitätsprinzips darstellen und somit eine unerwünschte Erscheinung sind. Texturen können sehr unterschiedliche Ursachen haben, z. B.

- unterschiedliche Packungsdichten,
- Entmischungen stofflicher und granulometrischer Versatzkomponenten oder
- Orientierungserscheinungen anisometrischer Teilchen.

Insbesondere die Orientierung der Teilchen kann bei tonmineralhaltigen Versätzen erhebliche Probleme bereiten.
Aufgrund ihrer Plättchengestalt werden die Tonmineralien in einem Schergeschwindigkeitsgefälle ausgerichtet und bilden eine Mikrotextur, die z. B. einen homogenen, anisotropen Aufbau zeigen kann. Damit verbunden sind richtungsabhängige Eigenschaften. So ist z. B. die Trokkenschwindung der Tonmineralien in der Teilchenebene geringer als senkrecht zur Teilchenebene und die Wärmedehnung in der Teilchen-

ebene größer als senkrecht dazu. Texturen, die ihre Ursache in der Formgebung haben, treten deshalb oftmals erst nach dem Trocknen oder Brennen in Erscheinung. Dennoch, eine homogene, anisotrope Textur ist selten die Ursache für Deformationen und Bruch, weil die meisten keramischen Versätze neben den Tonmineralien noch unplastische Bestandteile enthalten, die der Ausbildung von Vorzugsorientierungen entgegenwirken.

Problematischer sind die Makrotexturen, z. B. die S-Texturen bei Mauerziegeln oder Langstabisolatoren, die vom Gleiten der Masse entlang der Schnecke der Strangpresse herrühren und mit einer Separation bzw. Anreicherung von Tonmineralien entlang der Gleitfläche an der Schnecke verbunden sind.

Mikro- und Makrotexturen lassen sich nicht immer voneinander trennen. Eine ausgeprägte Mikrotextur ist in der Regel die Voraussetzung für die Ausbildung makroskopisch erkennbarer Texturen.

Auf die Entstehung von Texturen und Formgebungsfehlern wird im Kapitel 3 im Zusammenhang mit den Formgebungsverfahren näher eingegangen.

3

3.1. Gießen

3.1.1. Vorbemerkungen

Das Schlickergießen ist für die Feinkeramik das vorherrschende Formgebungsverfahren, wenn es darum geht, größere oder formenmäßig kompliziertere, meist hohle Erzeugnisse herzustellen, z. B. Kaffeekannen, Sanitärkeramik, Zierkeramik. Aber auch bei der Herstellung von Feuertonwaren und temperaturwechselbeständigen, speziellen Feuerfesterzeugnissen, wie Pfeifen für Dannerrohrzüge, findet das Gießen Anwendung. Gegenüber der Rollerformgebung zeichnet sich das Gießen durch einen höheren Anteil lebendiger Arbeit aus und erreicht demnach nicht die Produktivität der Rollerformgebung. Daran hat auch die Entwicklung moderner Gießanlagen nichts geändert, obwohl im Vergleich zum Gießen von Hand die Einführung mechanisierter und teilautomatisierter Gießanlagen zweifellos eine entscheidende Leistungssteigerung gebracht hat. Gestiegen sind aber auch die Anforderungen an die Stabilität des gesamten technologischen Prozesses. Für die Beherrschung des Gießprozesses sind u. a. folgende Faktoren von Bedeutung:

- die Schlickerparameter, z. B. Litermasse und Auslaufzeit,
- die Eigenschaften der Gipsformen, z. B. Saugfähigkeit und Feuchtigkeit,
- die Parameter der Anlage, z. B. Trocknungsverlauf.

Geht man davon aus, daß in der Produktion nach einer einmal optimierten Einstellung an der Gießanlage kaum noch Änderungen vorgenommen werden und sich auch die Eigenschaften der Gipsformen in der Regel wenig ändern, so sind die Ursachen für die Störungen der Produktion in erster Linie bei der Gießmasse, d. h. in den Schlickerparametern, und erst in zweiter Linie bei anderen Faktoren zu suchen.
Während es beim manuellen Gießen an den Gießtischen dem Arbeiter möglich war, sich auf die technologischen Gießmasseparameter einzustellen und Schwankungen auszugleichen, erfordert das maschinelle Gießen konstante Parameter bezüglich Eingießgeschwindigkeit, Scherbenbildungsgeschwindigkeit, Trocknungszeit und ähnlichem. Vom Standpunkt der Effektivität und Erzeugnisqualität sind Schwankungen der Gießmasseparameter deshalb nur in äußerst geringem Maß vertretbar. Jede Änderung der Gießmasseparameter, die ein neues Einstellen der Fertigungslinie bedingt, kann dazu führen, daß die Fertigungslinie uneffektiv arbeitet.
Die Taktzahl der Gießlinie, die Arbeitsweise der Gießventile und die Anordnung der Ausgußstation beim Hohlgußverfahren werden maßgeblich durch die Scherbenbildungsgeschwindigkeit beeinflußt. Ändert sich die Scherbenbildungsgeschwindigkeit während der Produktion, so besteht, wenn nicht entsprechende Massekorrekturen vorgenommen werden, die Notwendigkeit, die Anlage neu einzustellen. Es ergeben sich ökonomische Verluste einerseits durch die Unterbrechung des Produktionsprozesses und andererseits durch Minderwahl, die in der Zeit der Neueinstellung der Anlage in Form von zu dickem oder zu dünnem Scherben entsteht. Je schneller eine Fertigungslinie läuft und je größer die Durchsätze sind, desto größer wird auch die

Gefahr, daß Störungen durch nicht konstante Schlickerparameter auftreten, die sofort hohen Ausschuß zur Folge haben. Die Konstanz der Gießmasseparameter ist deshalb eine entscheidende Voraussetzung für die Herstellung von Gießartikeln auf Fließlinien. Gelingt es nicht, diese Parameter zu stabilisieren, ist selbst die leistungsfähigste Anlage nicht effektiv, und die Verluste durch Ausfallzeiten, Bruch und Minderwahl machen die Fertigungslinie unwirtschaftlich.

3.1.2. Physikalisch-chemische Zusammenhänge zwischen Masseeigenschaften und Gießtechnologie

3.1.2.1. Anforderungen an die Gießmasse und Ermittlung des optimalen Elektrolytgehaltes

Im Mittelpunkt aller Anforderungen an eine Gießmasse steht die Ausbildung eines einwandfrei gegossenen Erzeugnisses. Darüber hinaus wird im Interesse der Wirtschaftlichkeit eine schnelle Scherbenbildung verlangt. Auf diese Forderungen sind alle anderen Eigenschaften abzustimmen. Leider sind die Begriffe »einwandfreier Scherben« und »schnelle Scherbenbildung« wenig charakteristisch. Es ist deshalb notwendig, die Forderungen an die Gießmasse näher zu spezifizieren. Nach *Vycudilik* [67, 68] werden folgende Anforderungen gestellt:

- vollkommenes Ausfüllen aller Formenteile mit Masse,
- keine Entmischungserscheinungen bei längerem Stehen durch Sedimentation der größeren und schwereren Teilchen oder durch Phasentrennung fest-flüssig,
- minimale Korrosionswirkung auf die Gipsform,
- möglichst niedriger Wassergehalt der Suspension,
- erstklassige innere und äußere Oberfläche des Scherbens nach dem Ausgießen und Trocknen, d. h., sie muß glatt sein, der Scherben muß eine gleichmäßige Stärke aufweisen,
- homogener Scherben mit ausreichender Festigkeit beim Herausnehmen aus der Form,
- hohe Scherbenbildungsgeschwindigkeit,
- schnelles Trocknen des Scherbens in der Form nach dem Ausgießen,
- Beständigkeit der Erzeugnisse gegenüber Erschütterungen,
- schnelles Abstumpfen des Scherbens sowie rechtzeitiges und leichtes Herauslösen aus der Form.

Aus diesen Anforderungen ergeben sich bestimmte Eigenschaften, die bei der Gießmasse gezielt eingestellt werden müssen.

Würde man zur Verflüssigung ausschließlich Wasser verwenden, so wäre ein Wassergehalt von etwa 50 % erforderlich, um eine gießfähige Masse herzustellen. Durch den Einsatz von Verflüssigungsmitteln (s. Abschnitt 2.3.1.) reduziert sich dieser je nach Masseversatz auf 30 bis 35 %. Die gebräuchlichsten Verflüssigungsmittel oder Elektrolyte sind Soda und Wasserglas. In Abhängigkeit vom Masseversatz und von den Inhaltsstoffen des Wassers, z. B. unterschiedlich hartes Wasser, ergibt sich ein optimaler Gießbereich bei einem Elektrolytzusatz von 0,1 bis 0,8 %, bezogen auf den Feststoffanteil.

Für die Festlegung des Gießbereiches hat sich das standardisierte Verfahren zur »Ermittlung des optimalen Elektrolytgehaltes« oder des Peptisator- bzw. Verflüssigungsmittelgehaltes bewährt. Als optimaler Elektrolytgehalt wird die Menge an zugesetzten Verflüssigungsmitteln bezeichnet, die den keramischen Massen optimale technologische Eigenschaften der Gießfähigkeit verleiht (z. B. schlierenloses Auslaufen, keine Rückläufer), wobei zu dessen Charakterisierung die Konsistenz des Schlickers und der Wassergehalt mit zu bestimmen sind.

Zur Beurteilung der Konsistenz wird für die laufende Produktion das Auslaufviskosimeter (s. Abschnitt 2.5.2.) benutzt. Um das für die Verflüssigung günstigste Verflüssigungsmittel zu finden, führt man Vorversuche durch. Dann werden dem Gießschlicker unterschiedliche Mengen des ausgewählten Verflüssigungsmittels zugesetzt und die sogenannte Verflüssigungskurve aufgenommen, d. h., die Auslaufzeit in Abhängigkeit von der Elektrolytmenge bestimmt. Der Elektrolytzusatz ist dabei im Bereich von 0,1 bis 0,8 %, bezogen auf Feststoff, zu variieren. Im Rahmen dieser Versuchsserie ist auch die optimale Litermasse bzw. der optimale Wassergehalt des Schlickers zu ermitteln.

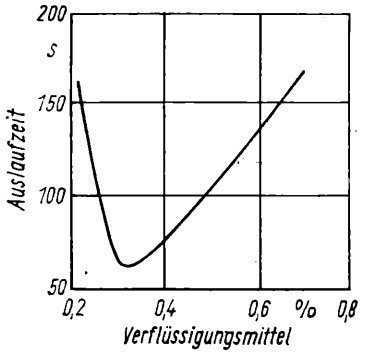


Bild 3.1. Viskositätskurve, bestimmt nach TGL 14932

Bild 3.1 zeigt den allgemeingültigen Verlauf einer Verflüssigungskurve, der dadurch gekennzeichnet ist, daß mit der Zugabe eines peptisierenden Elektrolyten die Auslaufzeit zunächst abnimmt, ein Minimum durchläuft und bei weiterer Zugabe wieder ansteigt.

3.1.2.2. Verformungseigenschaften von Gießmassen

Die Verformungseigenschaften von Gießmassen werden in erster Linie durch die Litermasse, die Verflüssigungsmittel und den Masseversatz bestimmt. Geht man davon aus, daß der Masseversatz im Produktionsbetrieb weitgehend konstant gehalten wird, so sind es im wesentlichen die beiden anderen Faktoren, die das Verformungsverhalten bestimmen.

Die plastische Viskosität von Betriebsschlickern (s. Abschnitt 2.4.2. und auch Bild 3.3) liegt im Bereich von 0,1 bis 2 Pa s (*Newton*sches Fließverhalten bei einem vereinbarten Punkt der Fließkurve vorausgesetzt). Diese Konsistenz kann zwar mit Auslaufviskosimetern kontrolliert werden; für eine vollkommene Charakterisierung der Gießbarkeit des Schlickers reicht diese Messung aber nicht aus. Die Verflüssigungskurve zur Bestimmung des optimalen Elektrolytgehaltes erfaßt nur einen kleinen Bereich. Außerhalb dieses Bereiches muß man sich mit der Bewertung – fließt oder fließt nicht – abfinden. Grundsätzliche Aussagen zur Charakterisierung der Verformungseigenschaften keramischer Schlicker können mit dem in Abschnitt 2.5.2. beschriebenen Rotationsviskosimeter des VEB Prüfgerätewerk Medingen gewonnen werden.

Der Einfluß der Verflüssigungsmittel bei konstantem Wassergehalt läßt sich mit Hilfe von Verformungskurven $D(\tau)$ gut darstellen (Bild 3.2). Diese Kurven ergeben sich, wenn man die Drehzahl des Rotors verändert und gleichzeitig die entsprechenden Werte der Schubspannung aufnimmt. Bei Drehzahlsteigerung erhält man die sogenannte Aufkurve und bei Drehzahlabnahme die Abkurve. Zwischen beiden Kurven liegt die Hysteresefläche, deren Ursache bei feinkeramischen Schlickern in der Regel die Thixotropie ist. Nach Bild 3.2 gehen die Suspensionen vom pseudoplastischen Verhalten bei geringem Elektrolytzusatz zum dilatanten Verhalten bei hohem Elektrolytzusatz über. Aufgrund des hohen Feststoffgehaltes der Suspension ist das di-

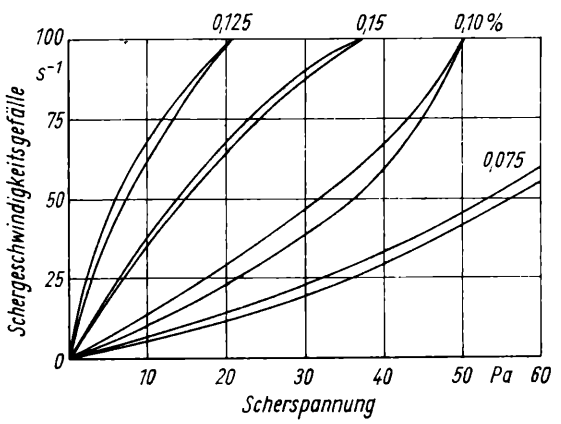


Bild 3.2. Verformungskurven einer Porzellanmasse, Wassergehalt 31 %, mit verschiedenen Mengen Soda verflüssigt [68]

latante Verhalten bei Überverflüssigung (0,125 und 0,15 % Soda) besonders deutlich ausgeprägt.

Aus den Verformungskurven können die Verflüssigungskurven, gleichsam wie durch Messen mit dem Auslaufviskosimeter, ermittelt werden. Hierzu wird die von *Green* definierte plastische Viskosität herangezogen (s. Abschnitt 2.4.2.). Bei der Darstellung von Viskositätskurven auf der Basis der plastischen Viskosität wird so vorgegangen, daß für gleiche D-Werte die plastische Viskosität gemäß Bild 3.3 ermittelt und in Abhängigkeit z. B. vom Elektrolytgehalt der Gießmassen aufgetragen wird.

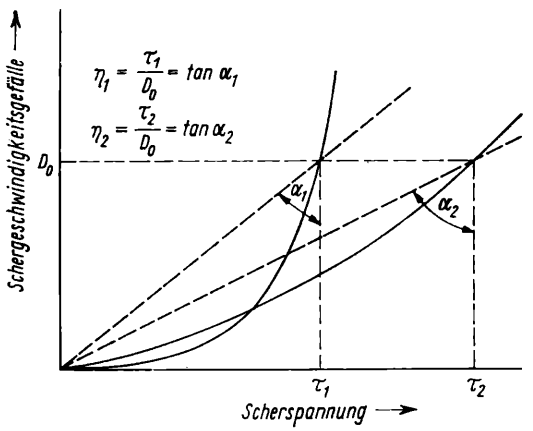


Bild 3.3. Ermittlung der plastischen Viskosität aus den Verformungskurven [68]

In vorteilhafter Weise läßt sich der Verflüssigungszustand keramischer Suspensionen mit der von *Teuchert* [42] gewählten Darstellungsweise (Bilder 3.4 und 3.5) interpretieren. Bild 3.4 zeigt die Abhängigkeit der Viskosität eines Porzellangießschlickers von der Höhe des Elektrolytzusatzes und der Scherrate. Mit steigender Scherrate nimmt die Viskosität des Schlickers bis zu einem Elektrolytgehalt von ≈0,12 % ab. Es ist der Bereich der Unterverflüssigung mit charakteristischem pseudoplastischem Fließen. Oberhalb von ≈0,12 % ändern sich die Verhältnisse. Das Fließverhalten wird dilatant.

Noch deutlicher kommt diese Aussage im Bild 3.5 zum Ausdruck, bei der der sogenannte Verflüssigungsgrad n nach Gl. (2.17), Abschnitt 2.4.2., in Abhängigkeit von der Höhe des Elek-

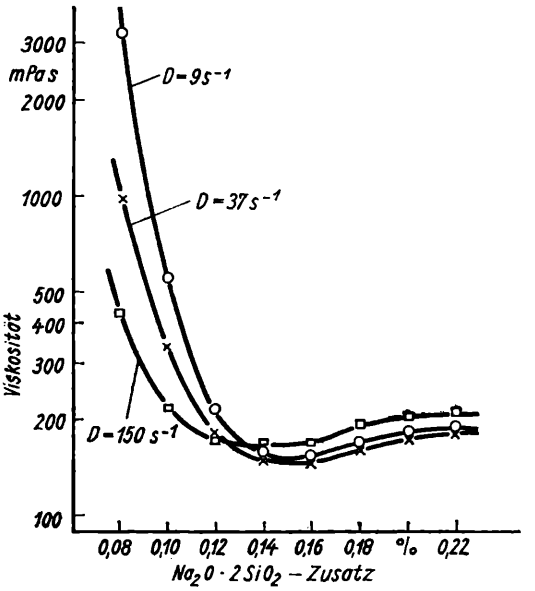


Bild 3.4. Abhängigkeit der Viskosität η einer Porzellanmasse vom Elektrolytzusatz und vom Schergefälle [42]

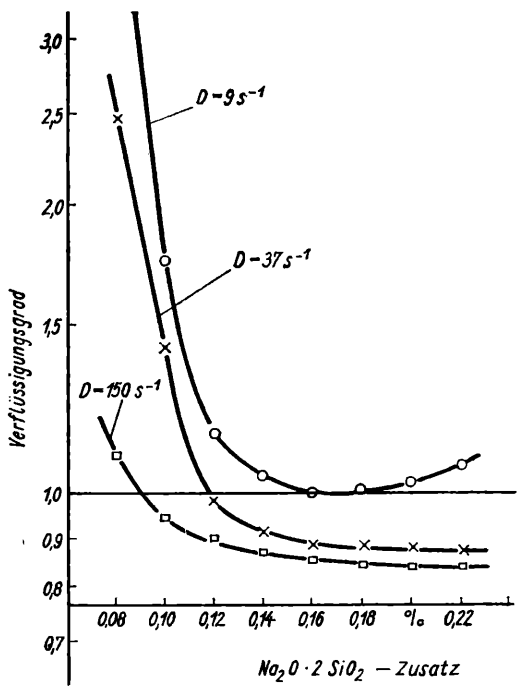


Bild 3.5. Änderung des Verflüssigungsgrades n in Abhängigkeit vom Elektrolytgehalt einer Porzellanmasse [42]

trolytzusatzes und der Scherrate aufgetragen ist. Einschränkend sei an dieser Stelle jedoch bemerkt, daß das dilatante Verhalten nicht bei allen Schlickern so deutlich ausgeprägt ist. Es können z. B. Kaolinsuspensionen durchaus pseudoplastisches Fließverhalten zeigen und dennoch überverflüssigt sein.

Trotzdem ist die Kenntnis solcher Kurvenverläufe für die Praxis von Bedeutung. Das Ausmaß der Abhängigkeit der Viskosität von der Scherrate ist für alle Fließvorgänge von Interesse, sei es in den Rohrleitungen und Behältersystemen oder in der Gipsform selbst. Nicht selten resultieren Formgebungsfehler (s. Abschnitt 3.1.3.3.) aus unterschiedlicher Strukturviskosität infolge unterschiedlicher Scherrate.

Ein weiteres Problem resultiert aus der Tatsache, daß sich nicht alle Rohstoffkomponenten gleich gut oder gleich schlecht verflüssigen lassen. Es kann durchaus der Fall eintreten, daß eine leicht verflüssigbare Komponente bereits überverflüssigt ist, bevor eine schwer verflüssigbare auf den Elektrolyten reagiert hat. Auch in diesem Falle ist eine deutliche Strukturviskosität erkennbar. Im Bemühen, sich möglichst dem *Newton*schen Fließverhalten anzunähern, ist es auch aus dieser Sicht zweckmäßig, nicht nur einen Elektrolyten, sondern eine Elektrolytkombination zu verwenden.

Die Verformungseigenschaften von Gießmassen sind neben dem Elektrolytgehalt auch vom Wassergehalt abhängig. Der Einfluß des Wassergehaltes ist aber ein völlig anderer als der von Verflüssigungsmitteln. Während Verflüssigungsmittel qualitativ das Verhalten der Gießmasse bestimmen, hat Wasser nur einen quantitativen Einfluß. In Abhängigkeit von der zugesetzten Wassermenge sinkt oder steigt die Viskosität; der Charakter der Gießmasse wird aber nicht verändert. Für Gießmassen ist es kennzeichnend, daß sich bei größerer Viskosität, also geringerem Wassergehalt, die Effekte, wie z. B. das Abweichen vom *Newton*schen Verhalten oder die Größe der Hysterese, verstärken. Für die Produktion heißt das, daß mit einer Erhöhung des Wassergehaltes zwar die Viskosität erniedrigt und die Eigenschaften der Gießmasse zum Teil verbessert werden können. Es ist aber nicht möglich, damit eine unzulängliche Verflüssigung wiedergutzumachen. Wenn der Schlicker bei einer der Litermasse entsprechenden Wasserzugabe noch nicht gießfähig ist, kann auch durch weitere Zugabe von Wasser kein technologisch sinnvoller Effekt erreicht werden. Die unerwünschten Erscheinungen, die durch das Verdünnen zunächst beseitigt werden, kommen bei der Scherbenbildung und beim Ausgießen der überschüssigen Masse aus der Form alle wieder zum Vorschein. Das Verdünnen der Gießmasse mit Wasser ist der denkbar ungeeignetste Weg zur Regelung der Gießmasseparameter. Besonders deutlich tritt diese Erscheinung bei Schlicker für die Henkelherstellung auf, der in der Regel mit einer geringeren Litermasse als Hohlgußschlicker (s. Abschnitt 3.1.3.2.) eingestellt wird. Ist dieser Schlicker nicht ausreichend verflüssigt, so kommt es trotz geringer Viskosität dazu, daß bestimmte Details der Form nicht mit Masse ausgefüllt werden und andere Formgebungsfehler, wie Gießrillen, auftreten.

Zur Beurteilung keramischer Gießmassen ist die Zeitabhängigkeit der Verformungseigenschaften, die sich in der *Thixotropie* (s. Abschnitt 2.4.2.) zeigt, von besonderer Bedeutung. Für die praktisch verwendeten Schlicker, die letztlich alle in geringem Maße thixotrop sind, äußert sich im Produktionsbetrieb die Thixotropie bzw. die Zeitabhängigkeit der Formbarkeit durch das Ansteifen des Schlickers in Ruhe. Durch Rühren oder Schütteln kann das Ansteifen wieder rückgängig gemacht werden. Eine starke Thixotropie führt zu erheblichen Schwierigkeiten beim Ausgießen der Gießmasse aus der Form nach der Scherbenbildung. Der Schlicker kann dabei zeitweilig eine so hohe Viskosität erreichen, daß er gar nicht oder nur unvollkommen aus der Form ausläuft. Formgebungsfehler und Rohbruch sind die Folge. Gefährdet sind auch Rohrleitungen und Behälter, in denen der thixotrope Schlicker über einen längeren Zeitraum zur Ruhe kommt.

Ein Vorteil der Thixotropie, auf den in der Literatur gelegentlich hingewiesen wird, ist die Tatsache, daß die Oberfläche des Scherbens nach dem Ausgießen schneller ansteift. Damit wird die Ausbildung von sogenannten Rückläufern verhindert, die bei der Produktion auf Fließlinien, bedingt durch die geringe Verweilzeit auf den Ausgußtischen, auftreten können. Diese positive Eigenschaft kann aber ebensogut der Rest-Pseudoplastizität zugeschrieben werden, die gute Gießmassen besitzen sollen, was

gleichbedeutend mit einer zunehmenden Viskosität bei geringer werdender Scherrate ist. Rückläufer treten bei vollkommen verflüssigten Schlickern, also im Minimum der Verflüssigungskurve, auf oder bei zu starker Thixotropie, wenn das Ausgießen des Restschlickers bereits Schwierigkeiten bereitet. Die positiven Eigenschaften der Thixotropie sind – so gesehen – recht zweifelhaft.

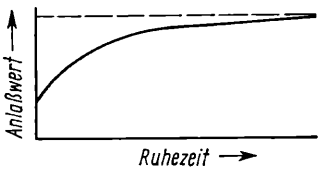


Bild 3.6. Erstarrungsvorgang einer thixotropen Suspension

Bild 3.6 zeigt den allgemeingültigen Verlauf des Erstarrungsvorganges thixotroper Suspensionen, d. h. der Ausbildung und Erhöhung des Anlaßwertes τ_0 in Abhängigkeit von der Ruhezeit, wie er von verschiedenen Autoren nachgewiesen wurde [68 bis 70]. Nach diesen Untersuchungen ist der Versteifungsvorgang eine chemische Reaktion erster Ordnung und folgt einem logarithmischen Gesetz [40]. Durch die Geschwindigkeit des Versteifungsvorganges (Ausbildung der Kartenhausstruktur) und den Grenzanlaßwert (End-Gelstärke) ist das thixotrope System ausreichend gekennzeichnet.

In der Praxis interessieren vor allem die Geschwindigkeit und das Ausmaß der Zunahme des Versteifungsvorganges sowie die Möglichkeiten, die Thixotropie gezielt zu beeinflussen. Die Ausbildung der Kartenhausstruktur bei thixotroper Erstarrung, die von *Weiß*, zitiert in [71], experimentell durch Vakuumverdampfen eingefrorener Suspensionen nachgewiesen wurde, ist nur möglich, wenn die Tonmineralteilchen ungenügend abgeschirmt sind und zwischen ihnen Anziehungskräfte wirken. Das bedeutet, daß das Auftreten der Thixotropie in erster Linie an eine unzulängliche Verflüssigung gebunden ist. Konstante Litermasse vorausgesetzt, nimmt die Thixotropie mit fortschreitender Verflüssigung ab und erreicht fast deckungsgleich im Minimum der Viskosität ebenfalls ein Minimum. Für die Thixotropie ergibt sich damit ein nahezu korrespondierender Verlauf zu Bild 3.1. Aus diesem Verhalten kann der Praktiker ableiten, daß das beste Mittel zur Einschränkung der Thixotropie eine vollkommenere Verflüssigung ist.

3.1.2.3. Einflüsse auf den Scherbenbildungsprozeß

Grundsätzlicher Ablauf der Scherbenbildung

Die Feststoffanreicherung an der Grenze Form/Schlicker kann man als Diffusionsvorgang oder Filtrationsvorgang mathematisch beschreiben. Unter Zugrundelegung eines Diffusionsprozesses wurde die Kinetik der Scherbenbildung von *Deeg* [72] theoretisch erarbeitet. *Dietzel* und *Mostetzky* [73] haben die sich daraus ergebenden Abhängigkeiten des Scherbenwachstums von dem »Diffusionskoeffizienten« im Dreiphasensystem Gips/Scherben/Schlicker experimentell bestätigt. Gut ist die Diffusionstheorie im Schlicker und Scherben erfüllt, wobei sich am Übergang vom Gips zum Scherben der »Diffusionskoeffizient« sprunghaft ändert, Bild 3.7. Abweichungen ergeben sich für die Gipsform, für die *Mostetzky* [74] das besondere Verhalten

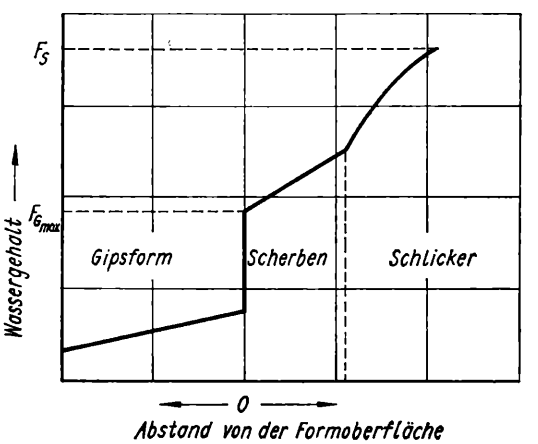


Bild 3.7. Schematische Darstellung der Wasserverteilung im System Gips/Scherben/Schlicker [11, 73]

F_S Wasserkonzentration im Schlicker
$F_{G\,max}$ maximal mögliche Wasserkonzentration in der Form

von Flüssigkeiten in Porensystemen verantwortlich macht.

Die physikalische Grundlage der Diffusionstheorie ist das 1. *Fick*sche Gesetz, Gl. (3.1), mit dem der diffusionsbestimmte Vorgang des Wasserentzuges beschrieben wird.

$$\frac{dx}{dt} = K\, D_K \frac{\Delta c}{x} \tag{3.1}$$

x Scherbenstärke
t Zeit
K Systemkonstante
D_K Diffusionskoeffizient
Δc Differenz der Wasserkonzentration an der Zwischenschicht Schlicker/Form

Die Integration dieser Differentialgleichung zeigt, daß die Scherbenbildung nach einem Wurzel/Zeit-Gesetz verläuft. In seiner vereinfachten Form läßt sich die Gesetzmäßigkeit der Scherbenbildung mit Gl. (3.2) angeben.

$$x = k\sqrt{t} \tag{3.2}$$

x Scherbenstärke (in cm)
k Konstante (in cm $\text{min}^{-\frac{1}{2}}$)
t Dauer der Scherbenbildung (in min)

Bei Gießmassen für Haushaltporzellan beträgt die Konstante k etwa 1,0 cm $\text{min}^{-\frac{1}{2}}$ [68].

Das $\sqrt{t}$-Gesetz fanden auch die Autoren, die über den Weg der Filtrationstheorie die Scherbenbildung interpretierten. Anknüpfend an die Arbeit von *Hind*, wählten *Adcock* und *McDowall* [75] einen mathematischen Ansatz, bei dem sie von dem durch das Kapillarsystem ausgebildeten Druckgefälle ausgingen und auf der Grundlage der Gleichungen von *Kozeny* [76] und *Carmen* [77] für die Durchlässigkeit eines Pulverbettes die Filtrationstheorie entwickelten. Bei diesem Ansatz wird eine Schicht regellos angeordneter Festkörperteilchen betrachtet, die eine Fläche A mit der Schichtdicke x bilden und durch die eine Flüssigkeit der Viskosität η mit einer Druckdifferenz Δp bei einem Volumenstrom von dV/dt gesaugt wird [11].

Unter der Voraussetzung, daß die Strömung der Flüssigkeit laminar ist, läßt sich mit Hilfe der *D'Arcy*schen Gleichung die Permeabilität C der porösen Feststoffschicht angeben [75, 78]:

$$C = \frac{\eta\, x \frac{dV}{dt}}{A\, \Delta p}. \tag{3.3}$$

Den empirisch gefundenen Zusammenhang zwischen Permeabilität C und spezifischer Oberfläche O_{sp} beschreibt *Carmen* [77] folgendermaßen:

$$O_{sp}^2 = \frac{g\, P_G^3}{5\, C\, (1 - P_G)^2} \tag{3.4}$$

Durch Auflösen von Gl. (3.4) nach C und Einsetzen in Gl. (3.3) folgt Gl. (3.5):

$$\frac{\frac{dV}{dt}\, \eta\, x}{A\, \Delta p} = \frac{g\, P_G^3}{5\, O_{sp}^2\, (1 - P_G)^2}. \tag{3.5}$$

Die Volumenzunahme des Scherbens während der Scherbenbildung läßt sich bei Einbeziehung des Scherbendickenwachstums dx mit Gl. (3.6) beschreiben:

$$A\, dx = \frac{V_1\, dV}{V_2 - V_1} \tag{3.6}$$

g Erdbeschleunigung
P_G Porenvolumen der Feststoffschicht
A Fläche des Scherbens
x Scherbenstärke
V_1 Volumen des Scherbens
V_2 Volumen des Schlickers mit dem Feststoffvolumenanteil $V_1\,(1 - P_G)$.

Durch Umstellen von Gl. (3.6) nach dV bei gleichzeitiger Substitution von V_2/V_1 durch y ergibt sich nach Einsetzen in Gl. (3.5) und anschließender Integration die Gleichung (3.7) [75]:

$$x = \frac{1}{O_{sp}\,(1 - P_G)} \sqrt{\frac{2g\, \Delta p\, P_G^3}{5\eta\,(y - 1)}}\, \sqrt{t}. \tag{3.7}$$

Mit dieser Beziehung sind wesentliche Abhängigkeiten des Scherbenbildungsprozesses fixiert, wenngleich nicht in jedem Falle die ursächlichen Zusammenhänge, die vor allem für den Praktiker relevant sind, sofort erkannt werden können. Der Scherbenbildungsprozeß ist ein äußerst komplexer Vorgang, der nicht nur durch die Filtration, sondern auch durch die Koagulation, das heißt, durch die interpartikulare Wechselwirkung und den Ionenaustausch, beeinflußt wird.

Im folgenden sollen deshalb die wesentlichsten Parameter, die den Scherbenbildungsprozeß beeinflussen, wie

- Litermasse und Eigenschaften der festen Phase,
- Eigenschaften der Gipsform,

- Verflüssigungsgrad des Schlickers,
- Verflüssigungsmittel und
- Temperatur des Schlickers

näher behandelt werden.

Litermasse und Einfluß der festen Phase

Die Notwendigkeit der Beschleunigung der Scherbenbildung beim maschinellen Gießen, die ebenfalls angestrebte und für die Automatisierung unumgängliche Verringerung der Feuchtigkeit der Formen sowie die damit verbundene niedrige Korrosion der Formen sprechen dafür, mit geringen Wassermengen, also mit hoher Litermasse, zu arbeiten. Der Verflüssigungsmittelzusatz ist dabei genau einzustellen und soll nicht höher als unbedingt erforderlich sein. Das heißt, daß die Litermasse nicht willkürlich angenommen werden kann, sondern im Ergebnis der optimalen Verflüssigung festgelegt wird. Aus dieser Sicht sind dem Einfluß der Litermasse, der in Gl. (3.7) durch die Größe y gegeben ist, bereits gewisse Grenzen gesetzt.
Einen weit stärkeren Einfluß haben die Zusammensetzung und das Körnungsband der festen Phase. Nach Gleichung (3.7) bestehen die Abhängigkeiten

$$x \sim O_{sp}^{-1} \text{ und } x \text{ annähernd} \sim P_G .$$

In der Praxis werden bei solchen Betrachtungen gern die Begriffe plastischer und unplastischer Anteil gebraucht. Allgemein gilt, daß die Scherbenbildung um so langsamer verläuft, je feiner die Masse und je höher ihr plastischer Anteil ist. Im Extremfall kann bei sehr feiner plastischer Phase eine so dichte Schicht von Tonmineralien an der Gipswand entstehen, daß eine weitere Scherbenbildung durch Behinderung der Diffusionsvorgänge unmöglich wird. Umgekehrt kann mit einer Erhöhung des unplastischen Anteils die Scherbenbildung beschleunigt werden. Eine solche Regelung der Scherbenbildung, die gleichbedeutend mit einer Versatzänderung ist, stellt allerdings einen tiefen Eingriff in den technologischen Vorgang dar und kommt für den Produktionsbetrieb kaum in Frage.
Wesentlich geeigneter für die Regulierung der Scherbenbildungsgeschwindigkeit ist die Zugabe gemahlener Glühscherben, da diese die Zusammensetzung der Masse nicht verändern. Die zugesetzte Menge an Glühscherben wird durch die geforderte Trockenbruchfestigkeit des Scherbens begrenzt, da der Glühscherben zwar dieselbe Zusammensetzung wie die Masse besitzt, die plastischen Bestandteile aber, die die Trockenbruchfestigkeit herbeiführen, durch den Glühbrand in unplastische Bestandteile umgewandelt wurden. Oftmals lassen sich Schwankungen des plastischen Anteils oder Eigenschaftsänderungen der Kaoline durch eine Erhöhung oder Erniedrigung des Glühscherbenanteils gut ausgleichen.

Eigenschaften der Gipsformen

Die vorzüglichen Diffusionseigenschaften des Gipses sind der Grund, weshalb Gipsformen auch heute noch für das keramische Gießen eingesetzt werden. Sie ermöglichen den für die Scherbenbildung erforderlichen Saugdruck.
Nach Gl. (3.7) ist $x \sim \sqrt{\Delta p}$.
Die Größe des Saugdruckes wird durch den Porenvolumenanteil und durch die Art und Verteilung des Porenvolumens in der Gipsform bestimmt. Zur Charakterisierung der Saugfähigkeit der Form wird deshalb nicht das Porenvolumen herangezogen, sondern der Diffusionskoeffizient des Schlickerwassers in der Form. Der Diffusionskoeffizient kann näherungsweise über die Gl. (3.8) [79, 81],

$$D_g \approx \frac{h^2}{t} \tag{3.8}$$

D_g Diffusionskoeffizient des Schlickerwassers im Gipsformenkörper
h Steighöhe des Wassers in einem Gipsformenkörper mit konstantem Querschnitt zur Zeit t, gemessen von der Berührungskante Formenkörper/Wasseroberfläche bis zur Grenze naß/trocken im Prüfkörper

ermittelt werden. Nach TGL 18879 wird D_g als Tränkungskoeffizient bezeichnet und in $cm^2\ s^{-1}$ angegeben. Für Gipsformen soll der Tränkungskoeffizient einen Wert um $3 \cdot 10^{-2}\ cm^2\ s^{-1}$ haben [11]. Zu hohe D_g-Werte bewirken sehr dichte Scherben, die dann den weiteren Wassertransport durch den Scherben behindern und zu einem Rückgang der Scherbenbildungsgeschwindigkeit führen.
Ein weiterer von der Gipsform ausgehender Effekt resultiert aus den Koagulationsvorgängen an der Grenzfläche Gipsform/Schlicker. Bereits *Johnson* und *Norton* [82] haben bewiesen, daß der Prozeß der Scherbenbildung nicht schlechthin eine Filtration ist, sondern daß gleichzeitig

eine Koagulation der stabilisierten Tonmineralsuspension durch Ca^{2+}-Ionen an der Wand der Gipsform eintritt. Im Falle fehlender Koagulation an der Formenwand käme es zu einer langsameren Scherbenbildung, und der entstehende Scherben würde einen dichteren, wenig durchlässigen Aufbau zeigen.

Daß es zu chemischen Reaktionen zwischen dem Schlicker und der Gießform kommt, beweisen auch die Kristallausscheidungen, die während der Produktion auf den Gipsformen entstehen. Diese Ausblühungen sind Natriumsulfatkristalle, die infolge der Reaktion zwischen dem Gips und vorzugsweise der im Gießschlicker gelösten Soda entstehen. Die Soda gelangt mit dem Wasser in die Gipsform. Nach der Reaktion mit dem Gips wandert das gut wasserlösliche Natriumsulfat beim Trocknen mit dem Kapillarwasser zur Formenoberfläche zurück und scheidet sich dort in Form von Kristallen ab. Indem die Sodalösung in die Gipsform eindringt, bewirkt sie typische Erosionserscheinungen entlang den Kapillarkanälen. Mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops [83] wurde nachgewiesen, daß sich die Poren und Löcher mit der Anzahl der Abgüsse erweitern und die Oberflächengüte der Formeninnenseite beeinträchtigt wird. Unterstützt durch die Löslichkeit des Gipses in Wasser (0,2 g/100 cm^3), die ohnehin vorhanden ist, und die mechanische Erosion durch das Ein- und Ausgießen des Schlickers, sind nach 50 bis 80 Eingüssen die Formen verschlissen. Bei der Wiederaufbereitung von Rücklaufschlicker und Gießspänen aus der Gießerei, sogenanntem Gießereiabgang, muß man sich darauf einstellen daß Ca^{2+}-Ionen und SO_4^{2-}-Ionen die Verflüssigung merklich stören können, was durch zusätzliche Elektrolytanteile zu kompensieren ist.

Verflüssigungsgrad des Schlickers

Die geeignetste Form, die Scherbenbildung im Produktionsprozeß zu beeinflussen, ist die richtige Einstellung des Verflüssigungsgrades. Die Scherbenbildungsgeschwindigkeit zeigt, ebenso wie die Thixotropie, einen Verlauf analog der Verflüssigungskurve auf Bild 3.1 (Bilder 3.8a bis c). Mit der Zugabe an Verflüssigungsmitteln nimmt die Scherbenbildungsgeschwindigkeit ab, durchläuft ein Minimum und steigt bei weiterer Zugabe langsam wieder an. Das Minimum der Scherbenbildungsgeschwindigkeit liegt bei einem geringfügig höheren Gehalt an Verflüssigungsmitteln als das Minimum der Verflüssigungskurve [67]. Die niedrigste Thixotropie wird bei etwas geringerem Elektrolytgehalt als das Minimum der Verflüssigungskurve erreicht [51]. Für die Produktion bedeutet das, daß bei nahezu bester Verflüssigung die geringste, also schlechteste Scherbenbildungsgeschwindigkeit erreicht wird und mit zunehmender Unterverflüssigung die Scherbenbildungsgeschwindigkeit zunimmt.

Da für die Formgebung eine leichte Thixotropie und eine schnelle Scherbenbildung von Vorteil sind, ist es einleuchtend, daß Gießmassen, deren Betriebspunkt im Minimum der Viskositätskurve liegt, für die Verarbeitung nicht besonders gut geeignet sind. Die Gießlinge solcher Schlikker haben in der Regel auch keine glatte innere Oberfläche. Der Betriebspunkt einer guten Gießmasse liegt deshalb geringfügig im Unterverflüssigungsbereich, und zwar in dem Bereich der Kurve, bei dem Schwankungen in der Verflüssigung noch keine wesentlichen Eigenschaftsänderungen bewirken (Bereich *1*, Bild 3.8a). Eine weitere Verlagerung in den Unterverflüssigungsbereich führt zu instabilen Gießbedingungen

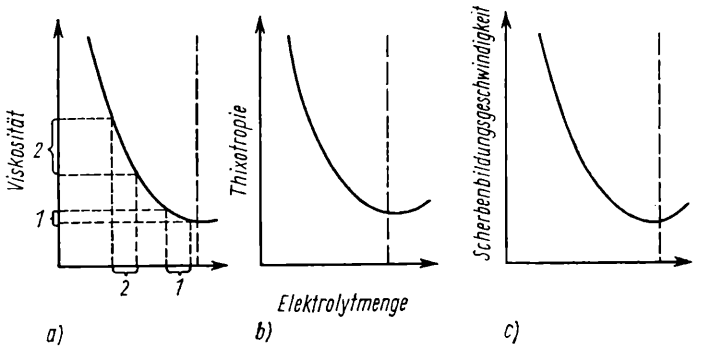


Bild 3.8. Schematische Darstellung von
a) **Viskosität**
b) **Thixotropie**
c) **Scherbenbildung**
in Abhängigkeit von der zugesetzten Elektrolytmenge

und darf trotz der Möglichkeit einer schnelleren Scherbenbildung nicht angestrebt werden (Bereich *2*, Bild 3.8a).

Die Abhängigkeit der Scherbenbildungsgeschwindigkeit von der Elektrolytmenge hat ihre physikalische Ursache in Veränderungen des Koagulationsablaufes und kommt in Gl. (3.7) durch die Größe P_G zum Ausdruck. Bei der Scherbenbildung werden die Teilchen auf einen Abstand angenähert, der, der DLVO-Theorie entsprechend, zu ihrer Koagulation führt [19, 84]. Die Packungsdichte des sich bildenden Scherbens ist nunmehr von der Elektrolytkonzentration abhängig, denn mit der Zugabe eines peptisierenden Elektrolyten nimmt die elektrostatische Energie der Partikeln zu. Die Dipolwechselwirkung bleibt davon im wesentlichen unberührt. Das hat zur Folge, daß bei optimaler Verflüssigung die Koagulation erschwert und ein dicht gepackter Scherben mit geringer Durchlässigkeit für das Dispergierungsmittel gebildet wird. Bei Nicht- oder Unterverflüssigung ist durch die Ca^{2+}-Belegung und den geringeren *p*H-Wert vor allem die Kantenladung der Tonmineralien geschwächt (s. Abschnitt 2.2.1.). Es entsteht ein schwammig lockerer Scherben mit ausgeprägter Kartenhausstruktur und damit einer größeren Durchlässigkeit.

Sowohl die größere Koagulationsneigung als auch die höhere Durchlässigkeit des sich bildenden Scherbens müssen als die Ursachen für den Anstieg der Scherbenbildungsgeschwindigkeit bei Unterverflüssigung angesehen werden. Mit zunehmender Überverflüssigung nimmt die Scherbenbildungsgeschwindigkeit ebenfalls zu, weil eine überhöhte Elektrolytkonzentration einen stärkeren Potentialabfall in der Doppelschicht der Partikeln bewirkt. Die Foige davon ist die Ausbildung lockerer Koagulationsstrukturen infolge verminderter elektrostatischer Abstoßung.

Verflüssigungsmittel

Der Scherbenbildungsprozeß wird maßgeblich durch die verschiedenen Verflüssigungsmittel beeinflußt. Die Wirkung der einzelnen Verflüssigungsmittel ist dabei recht unterschiedlich.

Soda wird als wasserhaltige oder wasserfreie Soda eingesetzt, wobei für die Herstellung keramischer Gießmassen überwiegend die wasserfreie oder calcinierte Soda verwendet wird. Ein mit Soda verflüssigter Schlicker zeichnet sich dadurch aus, daß er an der Formenwand gut ansetzt und eine schnelle Scherbenbildung bewirkt. Dieses Verhalten ist im wesentlichen auf die destabilisierende Wirkung des Gipses der Formenwand, vgl. S. 45, zurückzuführen. Der gebildete Scherben ist jedoch weich und verfestigt sich nur langsam. Die Innenflächen des Scherbens sind selten glatt und zeigen ein ruppiges Aussehen.

Wasserglas wird in der Regel als Natriumsilicat $Na_2O \cdot 3{,}0 \ldots 3{,}5\ SiO_2$ der Gießmasse zugesetzt und bewirkt in den meisten Fällen eine Erhöhung der Gießfähigkeit. Bei Verwendung von Wasserglas bildet sich der Scherben langsamer. Der Scherben besitzt infolge einer ausgeprägten Paralleltextur der Kristallplättchen eine glatte Oberfläche, ist dichter sowie härter als bei Sodazugabe und ermöglicht eine leichtere Handhabung beim Herausnehmen aus der Form sowie bei der folgenden Nachbearbeitung. Wasserglas ist deshalb gut für magere, wenig plastische Massen geeignet. Ein weiterer Vorteil des Wasserglases besteht darin, daß der Schlicker aufgrund der Schutzkolloidwirkung durch äußere Einflüsse nicht so leicht destabilisiert wird. Für die Verflüssigung feinkeramischer Massen wird vorwiegend ein Gemisch aus Soda und Wasserglas verwendet.

Aus Untersuchungen zur Verflüssigung keramischer Suspensionen ist bekannt, daß *anorganische und organische Polysäuren* bzw. deren Alkalisalze, wie Na-Tripolyphosphat oder Polyvinylsulfonat, also Verbindungen mit mehr als drei Säuregruppen, die klassischen Verflüssiger in ihrer Wirkung übertreffen. Die verflüssigende Wirkung der Polysäuren beruht auf einer Verstärkung der negativen Partikelladung infolge Anionenadsorption durch Komplexbildung.

Na-Polyphosphate werden in der Regel gemeinsam mit Soda und Wasserglas verwendet. Eine technische Bedeutung hat das Natriumtripolyphosphat $Na_5P_3O_{10}$ erlangt. Es besitzt eine intensiv verflüssigende Wirkung und behindert die Thixotropie. Gießmassen, die ausschließlich mit Natriumtripolyphosphat verflüssigt worden sind, weisen jedoch die unangenehme Eigenschaft auf, die Poren der Gipsformen zuzusetzen. Nach 10 bis 15 Eingüssen beginnt der Scherben, an der Form zu kleben [50]. Geringe Zusätze von Natriumtripolyphosphat zu anderen Verflüssi-

gungsmitteln zeigen aber eine günstige Wirkung. *Organische Substanzen*, wie Torf, Braunkohle sowie Lignin, Humin- oder Gerbstoffe, sind oftmals natürliche Bestandteile der Tone und Kaoline oder werden gezielt zugesetzt. So besitzen die Gießkaoline Spergau und Salzmünde einen Anteil organischer Bestandteile in Form von Braunkohle. Diese Bestandteile zeichnen sich dadurch aus, daß sie als Schutzkolloide wirksam werden und ein vorzeitiges Ansteifen der Gießmasse verhindern (s. Abschnitt 2.3.1.). Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß die organischen Verbindungen die Gipsform weniger stark angreifen als Soda.

Diese Gesichtspunkte und die erhöhten Anforderungen moderner Gießmaschinen an die Konstanz der Gießmasseeigenschaften haben verstärkt zur Entwicklung *synthetischer organischer Verflüssigungsmittel* geführt. In diese Kategorie gehören die unter den Handelsnamen Kaßler Braun, Dabrogan 02, Quebracho-Extrakt, Darvan, CNA P11, Melflux u. a. bekannt gewordenen Verflüssiger und Thixotropieregulatoren [50, 85 bis 88].

So wird z. B. Quebracho-Extrakt für tonkeramische Massen eingesetzt und Darvan in einer Mischung mit Citronensäure für die Verflüssigung von Al_2O_3.

Durch die Verwendung von polaren oder geladenen Makromolekülen erzielt man eine Schutzkolloidwirkung in der Weise, daß die Teilchen auf einen Abstand festgeschrieben werden, der die Annäherung der Tonmineralien behindert. Aus der Sicht der DLVO-Theorie (s. Abschnitt 2.3.1.) heißt das, daß bei Annäherung zweier Teilchen eine sterische Barriere auftritt. Sie macht es den Teilchen unmöglich, einen Abstand einzunehmen, der zu einer extremen Zunahme der aus den *van-der-Waals*schen Kräften resultierenden Anziehungsenergie führt. Solche Schutzkolloide können modifizierte Naturprodukte sein, wie Huminate oder Carboxylmethylcellulose, aber auch synthetische Polymere, wie z. B. Kondensationsprodukte auf der Basis von Aminotriazin, Formaldehyd und anderen [88, 89]. Werden diese als Natriumverbindungen eingesetzt, so wird neben der sterischen Hinderung bei der Flockung auch die Ionenstärke herabgesetzt. Einige Verflüssiger, z. B. Na-Huminat, bewirken auch eine starke Zunahme der Trockenbruchfestigkeit.

Eine gute Trockenbruchfestigkeit und eine hohe Beständigkeit soll auch *Natriumaluminat* den Massen verleihen.

Zu den Verflüssigungsmitteln mit geringer technischer Bedeutung zählen die *Natron- und Kalilauge*. In der Regel werden diese nur für spezielle Verflüssigungsprobleme herangezogen.

Die Vielfalt der Tone und Kaoline in den keramischen Massen kompliziert die Verflüssigung. Es gibt kein starres Rezept für alle Verflüssigungsprobleme. In jedem Falle muß für eine gegebene Masse die Wirkung der einzelnen Verflüssigungsmittel experimentell untersucht werden.

Das zur Herstellung von Gießmassen eingesetzte *Wasser* hat einen nicht unwesentlichen Einfluß auf das Ergebnis der Verflüssigung und die Gießmasseeigenschaften. Die Beeinflussung ergibt sich einmal durch die Inhaltsstoffe des Wassers und zum anderen durch dessen Temperatur. In Abhängigkeit von der Jahreszeit und dem Einzugsgebiet des Wassers entstehen Unterschiede im Gehalt an $CaCO_3$, $CaSO_4$, Fe_2O_3, Humusstoffen sowie verschiedenen Anionen und Kationen. So ist bei Verwendung inhaltstoffarmen Wassers der Verbrauch an Verflüssigungsmitteln beträchtlich geringer als z. B. bei Wasser mit einer hohen Carbonathärte.

Bei wasserlöslichen oder wasserempfindlichen Verbindungen ist man gezwungen, die Schlickerherstellung ohne Wasser vorzunehmen. Oxide, wie z. B. CaO und MgO, können mit Äthanol oder Isobutylalkohol angesetzt und mit Ölsäure oder Triäthanolamin verflüssigt werden [74]. Wasserfreie Schlicker werden auch dann hergestellt, wenn, wie das beim Foliengießen der Fall ist (s. Abschnitt 3.1.4.3.), ohnehin organische Bindemittel für den Zusammenhalt der Teilchen und die technologische Beherrschung des Prozesses erforderlich sind.

Temperatur des Schlickers

Für die Verarbeitung am besten geeignete Gießmassen sollen etwa 25 bis 30 °C warm sein. Kalte Schlicker neigen zum Nachsteifen. Das Ausgießen des Restschlickers aus der Form wird dadurch behindert, und die Erzeugnisse haben ein »ruppiges« Aussehen und neigen zum Verziehen. Oftmals ist auch die Porenbildung in der Gießware auf zu kalte Schlicker zurückzuführen.

Einen merklichen Einfluß hat die Temperatur

auch auf die Scherbenbildungsgeschwindigkeit. Bei einer Erhöhung der Schlickertemperatur von 20 °C auf 50 °C steigt die Scherbenbildungsgeschwindigkeit je nachdem, wie stark sich die Masse während des Gießens abkühlt, um 50 bis 100 %. Die Ursache für diese Erscheinung besteht darin, daß die erhöhte Temperatur die Viskosität des Wassers senkt und es dadurch schneller durch den sich bildenden Scherben und die Gipsform fließen kann [90]. In Gl. (3.7) ist dieser Zusammenhang durch die Größe η gegeben. Eine Beheizung der Schlickerbehälter wird in der Praxis aber nur dort durchgeführt, wo im Winter die Schlickertemperaturen zu stark abfallen. Bei dünnwandigen Erzeugnissen kann sich eine Temperaturerhöhung bis 50 °C positiv auf die Qualität des Scherbens auswirken. Für die Qualität der Gießmassen ist es wichtig, daß die Temperaturen zum Zeitpunkt der Einstellung und der Verarbeitung übereinstimmen.

Paßl und *Blaha* [51] haben die Temperaturabhängigkeit der Thixotropie für Porzellanschlicker untersucht. Durch Bestimmung der Thixotropiezahl mit Hilfe des *Kohl*-Viskosimeters wurde die in Bild 3.9 gezeigte Abhängigkeit von der Temperatur gefunden. Die Darstellung zeigt den Thixotropieverlauf für zwei Massen, deren Thixotropiezahlen an der unteren bzw. oberen Grenze, Abstand A, für gute Gießmassen liegen. Diese starke Abhängigkeit der Thixotropie von der Temperatur ist oftmals die Ursache, wenn durch jahreszeitlich bedingte Temperaturschwankungen die sonst konstante Masse in ihrer Qualität schlechter wird.

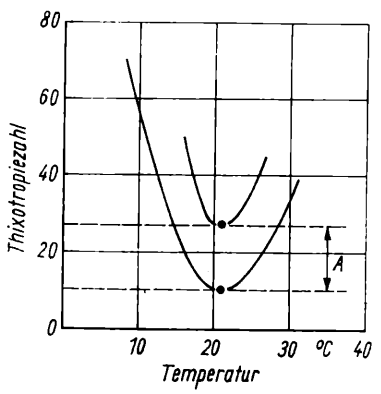


Bild 3.9. Abhängigkeit der Thixotropiezahl TC der Gießmasse von ihrer Temperatur [51]

3.1.3. Technischer Ablauf des Gießens und dabei auftretende Gesetzmäßigkeiten

3.1.3.1. Hohlguß

Das Hohlgußverfahren wird überall dort angewendet, wo es darauf ankommt, vor allem nichtrotationssymmetrische Hohlkörper mit relativ dünner Scherbendicke herzustellen. Das Prinzip des Hohlgusses zeigt der Formenschnitt nach Bild 3.10.

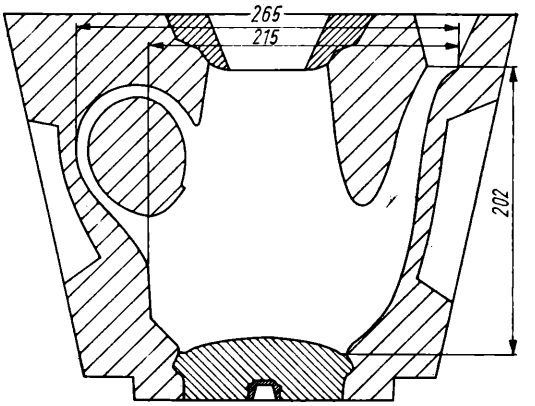


Bild 3.10. Formenschnitt einer Kaffeekanne [91]

Bei der Durchführung des Verfahrens wird zunächst die Form mit Gießmasse gefüllt. Nach beendeter Scherbenbildung gießt man den Restschlicker, der nicht zur Scherbenbildung benötigt wurde, durch Umkippen der Form aus. Die Form verbleibt dabei so lange in der Kippstellung, bis die nicht verfestigte Gießmasse restlos ausgelaufen ist. Erst, wenn der Scherben seinen durch das Wasser hervorgerufenen Glanz verloren hat, also abgestumpft ist, wird die Form in die Normallage zurückgebracht. In Abhängigkeit vom Artikel schließen sich dann solche Arbeiten, wie das Ausstöpseln der Schonung mittels Massekerns, das Entfernen der Deckstücke und das Beschneiden des Falzes, an. Analoge Arbeiten treten in der Geschirrindustrie, in der Sanitärkeramik und auf speziellen Gebieten in der technischen sowie Feuerfestkeramik auf.

Wichtig ist es, daß mit diesen Folgearbeiten erst begonnen wird, wenn die Artikel ausreichend angetrocknet sind und sich von selbst von der Gipsform ablösen. Wird mit den Folgearbeiten

früher begonnen, deformieren die Artikel, und Formgebungsfehler entstehen.
Im Anschluß an diese Arbeiten werden die Artikel in der Form schonend getrocknet, bis sie die für das Herausnehmen aus der Form erforderliche Festigkeit besitzen. In diesem meist lederharten Zustand (etwa 12 bis 15 % Wasser) führt man auch solche Arbeiten, wie das Garnieren, durch. Unter Garnieren versteht man das Verbinden von gegossenen oder gedrehten Teilstücken mittels Schlickers, z. B. das Ansetzen der Henkel an Tassen, das Fügen einzelner Ringe zu Überwürfen (großformatige Isolatoren für Durchführungen) oder das Zusammensetzen spezieller feuerfester Formsteine. Dem Herausnehmen der Artikel aus der Form (Bild 3.11) schließen sich die Formenrücktrocknung und die Weißtrocknung der Artikel an.

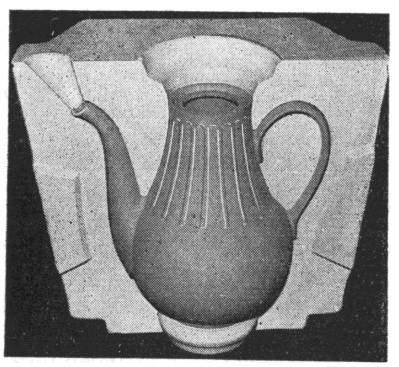


Bild 3.11. Geöffnete Form einer Kaffeekanne

Die weißgetrockneten Rohlinge besitzen nach dieser Trocknung eine Restfeuchte von 2 %. In diesem Zustand werden sie durch Verkratzen (Verputzen) von Schnitt- und Nahtstellen befreit. Schnittreste aus dem Inneren des Rohlings sind zu entfernen und Kratzstellen sowie kleinere Formgebungsfehler oder Beschädigungen zu verschwammen. Ist die Oberfläche des Artikels generell so schadhaft, daß ein Verschwammen des gesamten Körpers notwendig würde, muß die schadhafte Form oder der gesamte Formensatz ausgewechselt werden.
Die Vorstufe des maschinellen Gießens ist die heute noch weit verbreitete Technologie des Gießens von Hand mittels Gießschlauchs und Gießkegels. Von einem Gießmassevorratsbehälter aus, der in der Regel oberhalb der Gießlinie oder Gießtische angeordnet ist, gelangt die Gießmasse durch Rohrleitungen zu den Arbeitsplätzen der Gießer. Über einen Gummischlauch, der mit der Rohrleitung verbunden ist, wird die Gießmasse in die Formen gegossen. Der Gießkegel (Bild 3.12), der auf dem Gummischlauch aufgeschraubt ist, wird dabei mit seiner Spitze so in die Form gesenkt, daß der Schlickerstrahl senkrecht auf den Boden der Form auftrifft. Zur Regulierung des Massestrahles dient ein Absperrventil. Die Aufgabe des Gießkegels ist es, die aus dem Schlauch austretende Gießmasse gemäß Bild 3.12 über eine größere Fläche in die Form zu leiten. Durch diese Maßnahme werden eingeschlossene Luftblasen aus dem Schlicker entfernt und damit im Zusammenhang stehende Gießfehler vermieden. Insbesondere bei Kannen mit Falz oder mit angegossenen Henkeln ist darauf zu achten, daß keine Luft eingeschlossen wird. Beim Gießen von Hand wirkt man dem Einschluß von Luft entgegen, indem der eingegossene Schlicker mit einem Holzstab umgerührt wird. Nach Beendigung der Scherbenbildung ist darauf zu achten, daß das Ausgießen des Restschlickers aus der Form nicht schlagartig erfolgt. Schlagartiges Ausgießen kann ein vorzeitiges Ablösen des Scherbens von der Formenwand zur Folge haben und muß deshalb vermieden werden.
Das verfahrenstechnische Prinzip des maschinellen Gießens ist das gleiche wie beim Gießen von Hand. Bei der maschinellen Fertigung, vor allem bei der Herstellung dünnwandiger Erzeugnisse, wird am vorteilhaftesten in eine rotierende Form eingegossen. Man erreicht dadurch, daß sich ein gleichmäßiger Scherben bildet und Entmischungserscheinungen, z. B. durch Sedimentation, behindert werden. Im wesentlichen unterscheiden sich die Gießmaschinen nur dadurch vom manuellen Gießen, daß die schwere körperliche Arbeit beseitigt wurde und die Artikel- sowie Formentrocknung integrierter Bestandteil der Anlagen sind (s. Abschnitt 4.1.). Das Eingießen erfolgt bei diesen Anlagen in der Regel über eine elektromagnetisch gesteuerte Dosier- und das Ausgießen durch eine Kippvorrichtung. Die Folgearbeiten, wie das Ausstöpseln der Schonung, das Herausnehmen der Rohlinge aus der Form oder das Verputzen und Verschwammen, werden weiterhin von Hand ausgeführt.

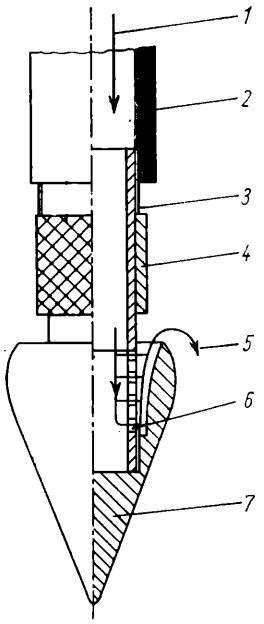


Bild 3.12. Ansicht und Halbschnitt eines Gießkegels [92]

1 Schlickerzuführung
2 Gummischlauch
3 Anschlußgewinde
4 Rändelmuffe
5 Schlickeraustritt
6 Kegelöffnungen
7 Kegel

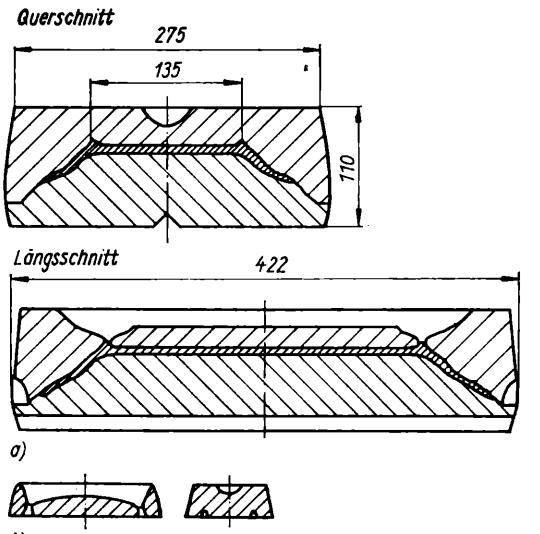


Bild 3.13. Formenschnitte für eine ovale Platte [91]

a) Platte
b) Kontrafuß

3.1.3.2. Vollguß

Der Vollguß wird bei Artikeln angewendet, die weder die Gestalt eines Hohlkörpers besitzen noch rotationssymmetrisch sind, z. B. spezielle Niederspannungsisolatoren, ovale Platten oder Henkel für Tassen und Terrinen. Oft verlangt es die Form des Erzeugnisses, daß mit Gipskernen gearbeitet wird. Man spricht dann auch vom *Kernguß*.

Der Unterschied dieses Verfahrens gegenüber dem Hohlguß besteht darin, daß die Scherbendicke durch den Abstand der Formenteile bestimmt wird und nicht durch die Standzeit des Schlickers. Bild 3.13 zeigt den Formenschnitt für eine ovale Platte.

Die zum Gießen verwendeten Formen sind, wie beim Hohlguß, mehrteilig. In die Form sind Eingießlöcher eingearbeitet, durch die der Schlicker in die Form gelangt. Es ist wichtig, daß das Eingießen des Schlickers kontinuierlich erfolgt. Nur so kann die Luft zwischen den Formenteilen entweichen. Bei großen Formen, deren Eingießlöcher nicht ausreichen, um genügend Schlicker zum Nachlaufen aufzunehmen, werden entweder Trichter aufgesetzt und mit Schlicker gefüllt, oder es muß nach dem ersten Eingießen noch etwas Schlicker nachgegossen werden, um ein vollständiges Ausfüllen der Form zu gewährleisten.

Im Anschluß an die Scherbenbildung erfolgt das Antrocknen. Wenn sich der Scherben von der Eingußöffnung zu lösen beginnt, kann mit dem Abnehmen des Oberteils der Form begonnen werden. Der Scherben trocknet dann besser. Die ersten Verschneide- und Verputzarbeiten können bereits in diesem Stadium durchgeführt werden, weil der Scherben noch auf dem Unterteil der Form liegt und sich kaum verziehen kann. Bei ovalen Platten werden z. B. in dieser Phase die Eingußstege mit dem Messer verschnitten und der Kontrafuß oder Notfußsteg aufgarniert. Das Verschneiden der Eingußstege muß sauber und gleichmäßig erfolgen. Damit die Platten auch nach dem Brand fest stehen, sollten die Stege leicht unterschnitten, also konkav verschnitten werden.

Die Kontrafüße bzw. Notfußstege, die die Platte vor Deformation beim Brand bewahren, werden parallel zu diesen Arbeiten gegossen. Nachdem der Plattenboden mit einem Pinsel oder Schwamm angefeuchtet wurde, wird der Notfußsteg im lederharten Zustand an der markierten Stelle aufgelegt und mit der Hand

leicht angedrückt. Danach ist der gesamte Boden der Platte zu verschwammen. Der Scherben ruht auf dem Unterteil der Form, bis er die Festigkeit erreicht hat, die er für das Umsetzen in den Weißtrockner benötigt.
Die geleerten Formen bleiben offen liegen, werden zurückgetrocknet, von Masseresten gesäubert und für den nächsten Guß wieder zusammengesetzt.
Der Vollguß kann in der Geschirrindustrie und der Sanitärkeramik auch in Kombination mit dem Hohlguß durchgeführt werden. Man spricht in diesem Falle von kombiniertem Guß. In Abhängigkeit vom speziellen Erzeugnis wird in der Regel das Unterteil im Vollguß und das Oberteil im Hohlguß hergestellt, z. B. bei einigen Saucieren. Dadurch, daß die Scherbenbildung beim Vollguß langsamer verläuft, wird erst das Unterteil gegossen. Wenn der Scherben des Vollgusses ausreichend verfestigt ist, kann der Restschlicker des Hohlgusses ausgegossen werden.
Ebenso wie der Hohlguß läßt sich der Vollguß mechanisieren. Am bekanntesten sind die Gießelevatoren, die den Einguß und den Formentransport mechanisieren.

3.1.3.3. Gießfehler und ihre Beseitigung

Formgebungsfehler im Gießereibetrieb können im wesentlichen auf folgende Ursachen zurückgeführt werden:

- falsche Schlickerparameter,
- Arbeitsfehler des Bedienungspersonals,
- fehlerhafte Gipsformen,
- falsche Einstellung der Gießanlage.

Die guten Verarbeitungseigenschaften eines Gießschlickers hängen, wie bereits im Abschnitt 3.1.2. gesagt, weitgehend von den Parametern Litermasse, plastische Viskosität und Thixotropie ab. Sollen die günstigsten Werte für die Scherbendicke und die Qualität der Erzeugnisoberfläche erreicht werden, so müssen, wie aus Untersuchungen von *Harkort* und *Hermann* [93] hervorgeht, die Litermasse, die Elektrolytzugabe und die Thixotropie in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen (s. auch Bild 3.8). Schlicker mit einer hohen Litermasse und einer hohen plastischen Viskosität bilden den Scherben schneller als Schlicker mit abnehmender Litermasse und abnehmender plastischer Viskosität. Stark unterverflüssigte Schlicker zeigen die typischen thixotropen Erscheinungen, füllen die Details der Form nicht richtig aus und ergeben einen weichen Scherben, der das Wasser zurückhält. Beim Ausgießen fließt der Schlicker schlecht und schlierig aus der Form. Die gegossenen Artikel kleben teilweise an der Form. Beim Herausnehmen der Artikel aus der Form ist die Gefahr der Deformation besonders groß, zumal der Scherben weich und höher wasserhaltig als bei optimaler Verflüssigung ist.
Reine Sodaschlicker tendieren zur *Schlieren- oder Riegelbildung*. Darunter versteht man mehr oder weniger starke Massewülste auf der Innenseite des Gießlings. Die Entstehung der Gießschlieren ist an bestimmte Fließvorgänge gebunden, die zur Orientierung der Tonmineralteilchen und zum Teil der Quarzkörner führen. Gießschlieren zeigen sich in Form von hellen und dunklen Inhomogenitäten mit bevorzugt horizontaler bzw. vertikaler Orientierung. Infolge der durch die Orientierung bedingten unterschiedlichen Trockenschwindung – in Richtung der Teilchenebene ist die Schwindung geringer als senkrecht dazu – bilden sich die unerwünschten Wülste und Vertiefungen. Diese Texturen sind demzufolge keine Entmischungen im chemischen Sinne, sondern Orientierungsinhomogenitäten [94, 95]. Eine Beseitigung kann durch teilweisen Ersatz von Soda durch Wasserglas erfolgen.
Bei Wasserglasschlickern wird oft die gehämmerte oder *Krisselstruktur* beobachtet. Krisselstrukturen sind strukturelle Unebenheiten auf der Innenwand des Gießlings. Ist der Scherben darüber hinaus noch hart und spröde und besitzt er beim Verschneiden und Verputzen die Tendenz zum Reißen, dann liegt mit großer Wahrscheinlichkeit eine Überverflüssigung mit Wasserglas vor. Schlieren und Krisselstruktur sind Formgebungsfehler, die auch bei einer gemeinsamen Verflüssigung mit Soda und Wasserglas auftreten.
Diese Fehler, die in der Schlickerqualität ihre Ursache haben, werden sehr stark durch die Technologie beeinflußt. Dem Praktiker ist bekannt, daß das Gießen mit dem gleichen Schlikker aus einem Topf bessere Resultate bringt als mit der Schlickerleitung. Verbessernd auf die Qualität wirkt sich auch das Eingießen in eine

rotierende Form aus. So kann man oftmals beobachten, daß Kannen, die an Gießbändern mit rotierenden Formen gegossen werden, keine Schlierenbildung zeigen und die Deckel, die mit dem gleichen Schlicker auf Handplätzen gegossen werden, eine starke Schlierenbildung aufweisen. Hier hilft nur eine Verbesserung des Schlickers durch Überprüfung der Verflüssigung.

Andere Fehler, die den Gießereibetrieb immer wieder vor Probleme stellen, sind auf die Anwesenheit von *Lufteinschlüssen* im Schlicker zurückzuführen. Es handelt sich hierbei vor allem um Gießporen und Scherbenauftreibungen (Pocken), s. Bild 3.14. Luftporen im Gießscherben sind sehr störend, wenn sie weder durch Schwämmen beseitigt noch mit Glasur überdeckt werden können. Durch Lufteinschlüsse bedingte Fehler treten vor allem dann auf, wenn der Schlicker während des Eingießens in die Form eine zu geringe Viskosität hat oder wenn bereits größere Luftmengen, bedingt durch die Aufbereitung, im Schlicker vorhanden sind. Durch eine verbesserte Aufbereitung und eine richtige Einstellung der Viskosität des Schlickers können Fehler durch Lufteinschlüsse eingeschränkt werden. Das beste Mittel, diese Fehler zu eliminieren, ist der Einsatz von Vakuumgießanlagen.

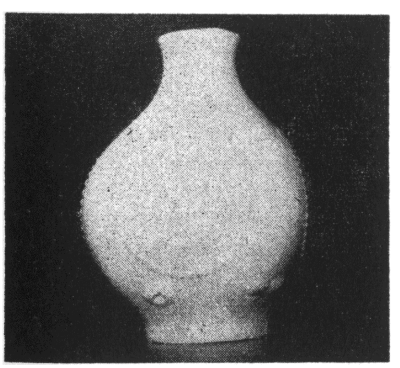


Bild 3.14. Scherbenauftreibungen durch Lufteinschlüsse beim Gießen

Lunker treten vorzugsweise bei Vollgußerzeugnissen auf, wenn die Zuführungskanäle für den Schlicker verstopfen oder die Gießmasse die Details der Form nicht richtig ausfüllt. Die Ursache hierfür ist in erster Linie in der Verflüssigung des Schlickers zu suchen. Besonders die stark unterverflüssigten Schlicker neigen zu einer schnellen Scherbenbildung und damit zum Verstopfen der Schlickerzuführungskanäle.

Gießrillen sind rillenförmige Vertiefungen auf dem gegossenen Scherben, die durch die Fließvorgänge bei der Verfestigung entstehen [94 bis 96]. Sie erscheinen auf der der Gipsform zugewandten Seite des Scherbens und treten insbesondere dann auf, wenn die Formen so gestaltet sind, daß die Ausbreitung des Schlickers in der Form horizontal erfolgt.

Indem die Gipsform dem einlaufenden Schlicker Wasser entzieht, wird der Schlicker infolge der Verfestigung in der gipsnahen Schicht an seiner Ausbreitung gehindert. Erst wenn der Druck der nachfließenden Schlickermasse groß genug geworden ist, wird diese Barriere überwunden, und es kommt zu einer ruckartigen Ausbreitung des Schlickers, was durch den Anlaßwert desselben noch begünstigt wird. Der Vorgang wird zusätzlich durch die Oberflächenspannung des Schlikkers unterstützt. Diese ruckartige Ausbreitung des Schlickers führt zur stufenweisen Verfestigung der Masse, damit zur Ausbildung der Gießrillen auf dem Scherben und kann unter extremen Bedingungen sogar zur Erosion der Formen führen, die dann das Negativ der Gießrillen erkennen lassen.

Das beste Mittel gegen Gießrillen ist die Vermeidung horizontaler Fließvorgänge durch eine richtige Formengestaltung und eine optimale Verflüssigung, die ein möglichst *Newton*sches Fließen garantiert. Das Verdünnen eines unterverflüssigten Schlickers mit Wasser führt nicht zum Erfolg.

Ein immer noch weit verbreiteter Fehler auf feinkeramischen Erzeugnissen sind die *Gießflecke*. Gewöhnlich sind sie am gegossenen Artikel auf einer der unteren Wandflächen oder auf der Außenfläche des Bodens zu sehen. Bei schrägem Auftreffen des Schlickerstrahls auf die Form zeichnet sich ein Längsstreifen, bei senkrechtem Auftreffen ein Kreis ab. Die Ursache für diese Gießflecke ist in einer primären Orientierung der plastischen Masseteilchen parallel zur Formenwand zu suchen. Gießflecke fixieren die Spur des Schlickerstrahls. Sie können weitgehend vermieden werden, wenn der Schlickerstrahl auf den Boden einer rotierenden Form gelenkt wird oder die Masse beim Gießen von unten nach oben ansteigt (steigender Guß). Eine ältere

Methode zur Vermeidung von Gießflecken, die vor allem beim manuellen Gießen noch Bedeutung hat, besteht darin, die Form an der Stelle, auf die der Schlicker primär auftrifft, zuvor mit Masse zu bestreichen.

Ist die Entstehung von Gießflecken versatzbedingt und sind die aufgeführten Eingriffe in die Technologie nicht realisierbar, so sind der Glimmergehalt der Masse, der Anteil an Chlorid- oder Sulfatsalzen, der plastische Anteil der Rohstoffe und die Verflüssigung zu überprüfen. Durch das Eliminieren von Glimmer, Chlorid- und Sulfatsalzen sowie durch Verringerung des Anteils an plastischen Rohstoffen (Zumahlen von Scherben) oder Reduzierung des Elektrolytgehaltes lassen sich Gießflecke ebenfalls einschränken bzw. beseitigen.

Deformationen und *Risse*, die zum Teil erst nach dem Brand in Erscheinung treten, sind oftmals Formgebungsfehler. Die Ursachen hierfür können vielschichtig sein, und nicht immer läßt sich eine eindeutige Zuordnung treffen. Vorausgesetzt, daß sich am technologischen Regime nichts geändert hat, kommen folgende Ursachen in Betracht:

- Arbeitsfehler,
- stark thixotroper Schlicker,
- Entmischung beim Gießen.

Bei den *Arbeitsfehlern* steht das Verdrücken der Rohlinge beim Herausnehmen aus der Form an erster Stelle. Unsauberes Ausschneiden des Falzes, nicht sachgemäßes Entfernen der Schonung oder zu nasses Verschwammen können ebenfalls zu Deformationen und Rissen führen.

Thixotrope, insbesondere unterverflüssigte Schlicker begünstigen die Deformation der gegossenen Artikel, indem sie zur Ausbildung einer kartenhausähnlichen Struktur tendieren, das Wasser im Rohling zurückhalten und den Anlaßwert bei plötzlicher Bewegung (s. Abschnitt 2.4.2.) herabsetzen. Bei Erschütterung zeigen diese Artikel infolge der reversiblen Sol/Gel-Umwandlung Fließerscheinungen, die zur Deformation führen.

Risse als Folge von Entmischungserscheinungen können auf einen bereits vor dem Vergießen entmischten Schlicker oder auf Entmischungen, die sich innerhalb der Form vollziehen, zurückgeführt werden. Der erste Fall ist mit einer Änderung der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung und des Körnungsbandes für den gesamten Artikel verbunden. Als besonders rißempfindlich erweisen sich Erzeugnisse mit einem erhöhten Quarzanteil, die beim Brennen, bedingt durch den Modifikationswechsel des Quarzes, plötzlich lokale Änderungen in der thermischen Dehnung erfahren. Oftmals noch störender macht sich die mit der Erhöhung des Quarzes verbundene Verarmung an Tonmineralien bemerkbar. Die Folge davon ist die Abnahme der Trockenbruchfestigkeit und die damit verbundene Zunahme der Rißanfälligkeit.

Entmischungen, die sich während des Gießens innerhalb der Form vollziehen, ergeben Erzeugnisse mit inhomogener Rohstoffverteilung. Sie sind in der Feinkeramik einerseits durch Anhäufungen von Tonmineralien und andererseits von z. B. Quarzkörnern, die in der Regel den Hauptanteil der gröbsten Kornfraktion ausmachen, gekennzeichnet. Die Folge solcher Entmischungen sind Unterschiede im keramischen Verhalten innerhalb des Gießlings. Vor allem betrifft das die Schwindung, die Trockenbruchfestigkeit und die thermische Dehnung, die Anlaß zur Ausbildung von Spannungen geben und im ungünstigsten Fall zu einem Riß führen. Die Ursache für die Entmischungen dieser Art ist in den Strömungsverhältnissen des Schlickers innerhalb der Form zu suchen, sofern nicht grundsätzliche Fehler bei der Einstellung des Schlikkers, z. B. Tendenz zur Sedimentation, vorliegen. Allgemein gilt, daß sich an den Stellen der höchsten Strömungsgeschwindigkeit, z. B. an Verengungen der Form, vornehmlich die Tonmineralien ablagern und an den Stellen geringerer Strömungsgeschwindigkeit die groben Partikeln, z. B. die Quarze. Die Ursache dafür dürfte darin zu suchen sein, daß sich an den verengten Stellen die Tonmineralien in Strömungsrichtung anordnen und durch weiteren hindurchtretenden Schlicker gegen die Formenwand gedrückt werden. Anhäufungen von Quarz im Scherben lassen sich röntgenographisch und mikroskopisch gut lokalisieren.

Fehler, die in der Regel in diese Kategorie gehören, sind die Fußrisse an der Eingußstelle bei ovalen Platten [97], Blitzrisse bei Hohlgeschirr sowie die Nahtstelle in der Mitte des Scherbens bei Vollgußartikeln [98].

Zur Beseitigung solcher Entmischungen müssen Änderungen der Strömungsverhältnisse in der

Form vorgenommen werden. Durch Ausnutzung der Zentrifugalkraft bei rotierenden Formen, Änderung der Zuleitungswege innerhalb der Form, Anwendung des steigenden Gusses und vor allem durch die richtige Einstellung der Fließeigenschaften der Masse können diese Fehler weitgehend vermieden werden.

3.1.4. Spezielle Gießverfahren

3.1.4.1. Druckguß

Der natürliche kapillare Saugdruck von Gipsformen wird mit etwa 0,1 MPa angegeben [11]. Zu einer Erhöhung der Scherbenbildungsgeschwindigkeit kommt man, wenn das Saugvermögen

- durch Herabsetzen des Außendruckes [99 bis 101] oder
- durch Einwirkung eines Überdruckes auf den Schlicker [102 bis 106]

vergrößert wird. Die derzeit ausgereiften technischen Lösungen basieren auf dem Überdruckprinzip.

Grundlagenuntersuchungen zur Scherbenbildung beim Druckgießen wurden von *Grünewald* und *Karsch* [106] durchgeführt. Bei ihren Versuchen verwendeten sie eine zylindrische Hartgipsform, die in eine Druckkammer mit perforiertem Gefäßboden eingelegt wurde (s. Bild

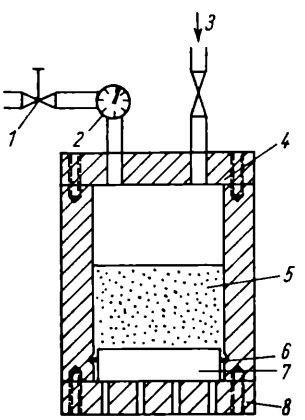


Bild 3.15. Prinzip des Druckgusses [106]

1 Druckminderventil, *2* Manometer, *3* Schlickerzufuhr, *4* Gefäßdeckel, *5* Schlicker, *6* Dichtung, *7* Form, *8* perforierter Gefäßboden

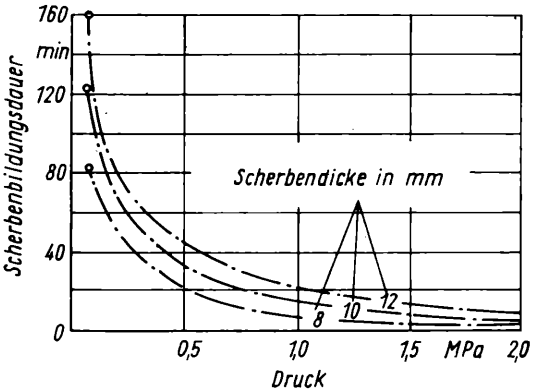


Bild 3.16. Scherbenbildungsdauer in Abhängigkeit vom Druck [106]

o Scherbenbildungsdauer unter Normalbedingungen mit Modellgips (GW = 1,2)

3.15). Die Zugabe des Schlickers erfolgte über ein Kugelventil. Danach wurde über eine zweite Leitung der Druck mit Hilfe von Druckluft über ein Druckminderventil aufgebracht. Nach beendeter Scherbenbildung wurde der Deckel der Form entfernt, der Restschlicker ausgegossen und der Formling mit der Form dem Druckgefäß entnommen.

Für diese Bedingungen erfolgte die Ermittlung der Scherbenbildungsdauer für einen Sanitärporzellanscherben mit 8, 10 und 12 mm Dicke in Abhängigkeit vom Druck. Bild 3.16 zeigt die Abhängigkeit der Scherbenbildungsdauer vom Druck und der Scherbendicke. Hiernach wirkt sich die Abnahme der Scherbenbildungsdauer bei Druckerhöhung im Bereich kleiner Drücke besonders deutlich aus. Zum Beispiel verringert sich die für die Bildung eines Scherbens von 8 mm Dicke benötigte Scherbenbildungsdauer von 80 auf 20 min, wenn der Druck von 0,1 auf 0,5 MPa erhöht wird.

Der Scherbenbildungsprozeß beim Druckgießen beruht nicht auf der Kapillarwirkung zur Gleichgewichtsbildung der Wasserkonzentration, wie es beim traditionellen Gießen in Gipsformen der Fall ist, sondern auf dem Prinzip der Druckfiltration. Vom Formenmaterial wird deshalb gefordert, daß der Filterwiderstand möglichst klein ist. Das heißt, daß nicht nur ein Material mit genügend permeablem Gefügeaufbau verwendet werden muß, sondern auch ein Material mit hoher Festigkeit, das die Herstellung von Formen mit geringer Wandstärke ermöglicht.

Aus diesem Grunde wurden für das Druckgießen poröse Plastformen entwickelt, die nach bisherigen Erfahrungen 30000 bis 40000 Gießzyklen aushalten sollen [105]. Der Druck, etwa 2 bis 5 MPa, wird in der Praxis direkt über den Schlicker aufgebracht (s. Abschnitt 4.1.4.). Die je Zeiteinheit und Fläche durch das Formenmaterial gepreßte Suspensionsflüssigkeit läßt sich folgendermaßen berechnen [74]:

$$\frac{\dot{V}}{A} = -\frac{w_F\, d}{w_S} + \sqrt{\frac{2\,p\,t}{w_S} + \left(w_F \frac{d}{S}\right)^2} \qquad (3.9)$$

$\frac{\dot{V}}{A}$ durchströmende Suspensionsflüssigkeit je Flächeneinheit
w_F Filterwiderstand des Formenmaterials
d Wandstärke der Form als Filter
w_S Durchströmungswiderstand des Scherbens
p wirksamer Filtrationsdruck
t Einwirkungszeit des Filtrationsdruckes.

Gl. (3.9) gilt unter der Annahme laminaren Fließens in den Kapillaren von Scherben sowie Form und berücksichtigt nicht das Zusammendrücken des Scherbens während der Formgebung. Dennoch kann man mit dieser Beziehung die Scherbenbildung qualitativ ermitteln, da entsprechend Gl. (3.10)

$$x \sim \frac{\dot{V}}{A} \qquad (3.10)$$

ist und die praktischen Erfahrungen eine gute Übereinstimmung mit den errechneten Werten ergaben [105].
Das Druckgießen hat aus keramischer Sicht im Vergleich zum Schlickergießen in Gipsformen außer der schnelleren Scherbenbildung noch andere wesentliche Vorteile:

- geringere oder sogar keine Trockenschwindung,
- höhere Grünfestigkeit des Scherbens,
- bessere Maßhaltigkeit der Erzeugnisse,
- weniger oder keine aus der Formgebung resultierenden Brennverwerfungen,
- geringere Anforderungen an Rohstoffe und Elektrolyte,
- keine Gipsverunreinigungen im Schlickerrücklauf.

Aus ökonomischer Sicht kommen noch hinzu:

- die Substitution der Gipsformen durch Plastformen,
- Wegfall der Formenrücktrocknung bei Gips,
- geringere Energiekosten bei der Erzeugnistrocknung,
- geringerer Platzbedarf der Anlage und
- Verbesserung der Arbeitsbedingungen in der Gießerei.

Das Druckgießverfahren hat sich inzwischen für das Gießen von Vollgußartikeln bewährt und erobert zunehmend in einer Kombination von Voll- und Hohlguß die Herstellung sanitärkeramischer Erzeugnisse. Eine maschinentechnische Lösung des Druckgießens ist in Abschnitt 4.1.4. näher beschrieben.

3.1.4.2. Elektrophoretischer Guß

Eine weitere Möglichkeit, Einfluß auf die Scherbenbildungsgeschwindigkeit zu nehmen, ist die Ausnutzung des ζ-Potentials dispergierter Teilchen bei der Elektrophorese.
Die prinzipielle Anwendbarkeit der Elektrophorese ist seit langem bekannt. Bereits 1911 wurde durch Graf *Schwerin* und *Illig* [107] die sogenannte »Elektroosmosemaschine« zur Entwässerung und Reinigung von Ton zum Patent angemeldet. Etwa seit 1939 gibt es ernsthafte Versuche, die Elektrophorese für die keramische Formgebung zu nutzen. Verschiedene Veröffentlichungen und Patente [108 bis 111] verweisen auf ein Verfahren, dessen verallgemeinerte Darstellung Bild 3.17 zeigt. Die Form wird hiernach als Anode ausgebildet und die Katode mittig in den Schlicker getaucht. Unter dem Einfluß des elektrischen Gleichfeldes wandern die Partikeln, wie in Abschnitt 2.2.1.3. beschrieben, zur Anode und lagern sich dort ab. Die Bemühungen waren insbesondere darauf gerichtet, das Schlickergießen in Gipsformen abzulösen. Trotz der opti-

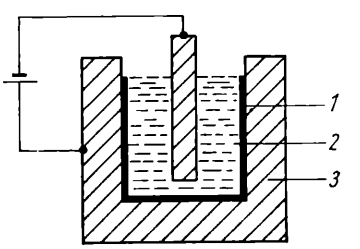


Bild 3.17. Prinzip des elektrophoretischen Gusses
1 Scherben, *2* Gießmasse, *3* Form

mistischen Darstellungen einiger Autoren muß kritisch bemerkt werden, daß das elektrophoretische Gießen von tonmineralhaltigen Massen mit erheblichen Problemen belastet ist. Zu diesen gehören:

- der hohe Feuchtegehalt des abgeschiedenen Scherbens und sein hoher Feuchtegradient,
- die Beherrschung der Feldgeometrie bei komplizierten Formen sowie
- die Anodenkorrosion, durch die die Anforderungen an das Formenmaterial komplizierter werden.

Erfolgreicher verläuft die elektrophoretische Gießformgebung bei unplastischen keramischen Rohstoffen, wie SiO_2, SiC, Al_2O_3 u. a., deren Teilchen bei entsprechender Feinaufbereitung und bei Beachtung des *p*H-Wertes ebenfalls eine ausreichend hohe Nettoladung besitzen [22, 112 bis 114].

Erfolgversprechend sind auch Verfahren, bei denen die Elektrophorese mit anderen Wirkprinzipien, z. B. Druck, gekoppelt wird. Hierbei wird entweder die elektrophoretisch abgeschiedene Masse im Nachhinein verpreßt [116 bis 118], oder die Suspension wird während der Elektrophorese mit Druck beaufschlagt, das heißt, einer Druckfiltration im elektrischen Gleichfeld unterzogen [19, 119].

In die erste Gruppe gehört ein Verfahren zur Herstellung plattenförmiger Keramikerzeugnisse, das unter der Bezeichnung »Elephant« bekanntgemacht wurde. Das Prinzip ist folgendes: Zwischen zwei gegenläufig rotierenden Walzen, die als Anode ausgebildet sind, wird aus einer Suspension, die von oben aufgegeben wird, ein endloses Band nach unten durch den Walzenspalt gezogen. Da beide Walzen die Anode bilden, entstehen zunächst zwei Schichten, die katodenseitig wieder zu einem Band vereinigt werden. Die Dicke des keramischen Bandes wird durch den Walzenspalt bestimmt und kann 4 bis 20 mm betragen. Im Anschluß an diese Formgebungsstufe erfolgt das Zuschneiden der Formate. Eine Weitergestaltung der Erzeugnisse im Sinne einer Oberflächenveredlung kann durch Stanzen vorgenommen werden. Die Vorteile des Verfahrens liegen auf energieökonomischem Gebiet und in der Realisierung einer geringen Scherbendicke. Wesentliche Nachteile sind die begrenzte Durchsatzleistung, die deutlich unter der von Fliesenpressen liegt, die recht problematische Scherbenablösung von den Walzen sowie der relativ hohe Zinkverbrauch infolge Anodenkorrosion.

Die Verbindung von Elektrophorese mit erhöhtem Schlickerdruck führte zum sogenannten Druckelektroosmose-Verfahren, das sowohl für die Entwässerung keramischer Suspensionen als auch für die Formgebung von Interesse ist. Als Formgebungsverfahren kommt die Druckelektroosmose-Entwässerung insbesondere für solche Erzeugnisse in Frage, die derzeit im Vollguß- oder Druckgußverfahren hergestellt werden. Das Prinzip des Druckelektroosmose-Verfahrens für die Herstellnng eines Masseblattes zeigt Bild 3.18. Die keramische Suspension (*1*) wird hiernach in eine elektrisch nichtleitende Form (*2*) mit gegenüberliegenden Elektrodenstempeln gebracht. Der eine Elektrodenstempel bildet die Anode (*3*) und der andere die für das Dispergierungsmittel durchlässige Katode (*4*). Nach dem Anlegen einer Gleichspannung (*5*) wird die Suspension unter Druck gesetzt, indem ein Stempel gegen den anderen oder beide aufeinanderzu bewegt werden, bis die für eine weitere Formgebung bestimmte Massescheibe die geforderte Konsistenz erreicht hat. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, den Druck durch die Suspension selbst aufzubringen. Die Abführung des Dispergierungsmittels über den Katodenstempel wird durch ein elektrisch leitendes Gewebe, oder ein nichtmetallisches Gewebe in Verbindung mit einem elektrisch leitenden Material erreicht. Als Anodenwerkstoffe

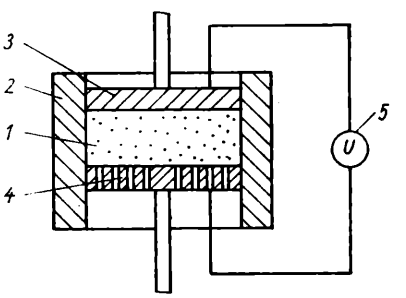


Bild 3.18. Prinzip der Druckelektroosmose-Entwässerung [119]
1 Schlicker, *2* elektrisch nichtleitende Form, *3* Anode, *4* Katode, *5* Spannungsquelle

können Metalle oder Nichtmetalle verwendet werden, sofern sie eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit besitzen und die aus der Anodenkorrosion resultierenden Restriktionen, wie geringe Verunreinigung der Masse infolge Anodenzersetzung, Materialkosten usw., erfüllen.

Bild 3.19 zeigt Entwässerungsversuche, die nach diesem Prinzip durchgeführt wurden. Die Entwässerung erfolgte bei konstantem Reaktionsdruck, das heißt, daß in dem Maße, wie das Wasser über den durchlässigen Katodenstempel entweicht, der Kolben bei Beibehaltung des Reaktionsdruckes nachgeführt wird. Als elektrische Führungsgröße wurde die Stromdichte konstant gehalten.

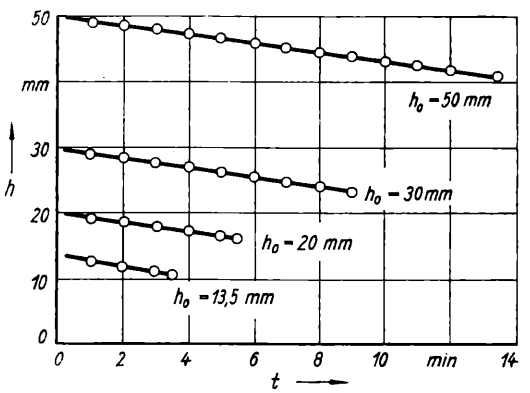


Bild 3.19. Füllstand in Abhängigkeit von der Zeit bei der Herstellung eines Masseblattes [19] (Schlickerdichte = 1,75 g cm^{-3}, Stromdichte = 13,3 mA cm^{-2}, Reaktionsdruck = 1,1 MPa)
h_0 Anfangsfüllhöhe

Obwohl bei diesen Untersuchungen für den durchlässigen Katodenstempel ein Filtertuch verwendet wurde, zeigen die Entwässerungskurven keine Merkmale einer Filtration. Im Detail lassen sich anhand von Bild 3.19 folgende wesentliche Aussagen treffen:

- Die Entwässerung erfolgt etwa zehnmal so schnell wie bei einer Kammerfilterpresse.
- Die Entwässerungskurven haben einen linearen Verlauf.
- Eine zunehmende Füllhöhe führt nicht zu einer drastischen Verringerung der spezifischen Materialausbeute.

Das charakteristische Merkmal der sonst üblichen Filtration, nämlich die Gültigkeit eines Wurzel/Zeit-Gesetzes, wird für die Druckelektroosmose-Entwässerung nicht nachgewiesen.

Die je Zeiteinheit und Fläche abgeschiedene Materialmenge ist um ein mehrfaches höher als bei der freien Elektrophorese (Bild 3.17). Der bessere Wirkungsgrad der Druckelektroosmose-Entwässerung resultiert insbesondere aus zwei Faktoren. Erstens nimmt in dem Maße, wie das Wasser über den Katodenstempel entfernt wird, die Feststoffkonzentration im Reaktionsraum zu, und zweitens wird das Wasser sowohl in den Kapillaren des Anodenscherbens als auch des Katodenscherbens elektroosmotisch in Richtung Katode bewegt. Durch die kurze Reaktionszeit ist eine grundlegende Voraussetzung erfüllt, die es gestattet, die Entwässerung direkt mit einer Formgebungsmaschine, z. B. Rollertaktstraße, zu koppeln.

Der Vorteil des Druckelektroosmose-Verfahrens gegenüber der thermischen Entwässerung besteht insbesondere im geringeren Energieverbrauch.

3.1.4.3. Foliengießen

Das Foliengießverfahren wird seit Beginn der siebziger Jahre industriell für die Formgebung oxidkeramischer Erzeugnisse eingesetzt. Es ermöglicht die Herstellung extrem dünner, ebener und in getrocknetem Zustand bearbeitbarer Folien, wie sie in zunehmendem Maße als Substrate und für Mehrlagen-Bauelemente in der Mikroelektronik zur Anwendung kommen. Das Prinzip des Foliengießverfahrens, das unter der Bezeichnung doctor-blade-process [120] in die Literatur eingegangen ist, zeigt Bild 3.20.

Der Gießvorgang erfolgt bei diesem Verfahren durch Rakelauftrag (*9*) der Suspension auf ein Trägerband (*6*). Als Trägerband eignen sich Polyester- und Celluloseacetatfilme, PTFE- und Polyethylenfolien sowie plast- und siliconbeschichtete Trennpapiere mit glatter, nichtquellender Oberfläche [11]. Das mit der Schlickerschicht versehene Band durchläuft einen Trokkenkanal (*10*), in dem ein Luftstrom definierter Temperatur nach dem Gegenstromprinzip die

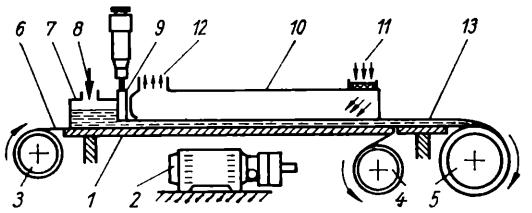


Bild 3.20. Prinzip einer Foliengießanlage [11]

1 nivellierbares Gießbett, *2* Motor mit Regelgetriebe, *3* Vorratsrolle des Trägerbandes, *4* Sammelrolle des Trägerbandes, *5* Sammelrolle der Keramikfolie, *6* Trägerband, *7* Gießkasten, *8* Schlickerzulauf, *9* Rakel, *10* Trockenkanal, *11* Lufteintritt mit Filter, *12* Absaugung, *13* Keramikfolie

Folie (*13*) trocknet. Im Anschluß an das Trocknen erfolgt die Trennung der Keramikfolie vom Trägerband und die Weiterverarbeitung der Folien entsprechend den Anforderungen der Erzeugnisherstellung.

Im Vergleich zu den bisher behandelten tonmineralhaltigen Gießmassen gibt es bei Foliengießschlickern einige Besonderheiten zu beachten. Bei der Aufbereitung der Suspension ist eine ausreichende Feinmahlung des Oxidversatzes im Dispergierungsmittel, u. U. in Gegenwart von Dispergatoren, erforderlich. Im Anschluß daran wird die Suspension unter Zugabe von organischen Bindemitteln in einer Kugelmühle homogenisiert. Diese Maßnahme ist bei oxidkeramischen Versätzen notwendig, um die Schlickerstabilität und Trockenfestigkeit des Erzeugnisses zu erreichen. Als Bindemittel werden durch Weichmacher modifizierte thermoplastische Polymere, wie Polyvinylbutyral, Polyvinylacetat, Celluloseester oder Polyacrylate, die aus ihren Lösungen oder Dispersionen elastische Filme bilden, verwendet [11]. Als Dispersionsmedium kommen den Bindemitteln entsprechende Flüssigkeiten, wie Alkohole, Essigsäureester, Ketone oder auch Wasser, sofern das Bindemittel die Herstellung wäßriger Polymerdispersionen erlaubt, zur Anwendung. Die Anteile von Bindemitteln und Dispersionsmedium sowie deren stoffspezifische Abstimmung aufeinander bestimmen maßgeblich das Gieß- und Trocknungsverhalten des Schlickers und damit die Qualität der Folien. Ebenso wichtig ist die Evakuierung der Suspension, mit der die eingeschlossene Luft entfernt wird. Die Einstellung der für das Gießen notwendigen Viskosität von 0,8 bis 5 Pa s wird durch Absaugen des überschüssigen Dispergierungsmittels erreicht.

Die Leistung von Foliengießanlagen liegt bei 1 m min^{-1} bei einer Folienbreite von 30 cm und einer Foliendicke zwischen 0,4 und 1 mm.

An einer Anwendungserweiterung des Verfahrens auf tonmineralhaltige keramische Versätze wird gearbeitet [121].

3.2. Plastische Formgebung

3.2.1. Anforderungen an bildsame keramische Massen und ihre Verformungseigenschaften

Um eine gute bildsame Formbarkeit zu gewährleisten, werden an die bildsame keramische Masse vor allem Forderungen bezüglich guter Verarbeitungseigenschaften, hoher Trockenbruchfestigkeit und möglichst homogenem, isotropem Gefüge gestellt.

Unter guter Verarbeitbarkeit ist eine große Verformbarkeit ohne Rißbildung zu verstehen, die durch die plastischen Rohstoffanteile erzielt wird und die Herstellung eines dünnwandigen Scherbens ermöglicht.

Die hohe Trockenbruchfestigkeit, die ebenfalls durch den plastischen Anteil und gegebenenfalls über eine optimale Korngrößenverteilung erreicht wird, ist notwendig, um die mechanische Festigkeit der geformten ungebrannten Erzeugnisse bei der Handhabung oder beim Umsetzen, z. B. auf Wagen, Elevatoren und Kreisförderer, zu gewährleisten.

Ein homogenes, isotropes Gefüge ist die Voraussetzung dafür, daß beim Trocknen und Brennen keine Erzeugnisspannungen entstehen. Dieses Idealgefüge zu erreichen ist in der Praxis allerdings so gut wie unmöglich. Bereits in den vorgeschalteten Aufbereitungsanlagen entsteht eine Masse mit entsprechender Vorzugsorientierung, die durch den Formgebungsprozeß entweder nicht aufgehoben oder in eine neue umgewandelt wird. Die Vorzugsorientierung hat ihre Ursache darin, daß auch bei der Aufbereitung die sich bewegenden Partikeln einem Geschwindigkeitsgefälle ausgesetzt sind, wodurch die anisotropen Teilchen ausgerichtet werden. Die plastische Formgebung tonmineralhaltiger Massen

führt somit immer zu einer Orientierung der Teilchen, d. h. zu einer anisotropen Mikrotextur in Richtung der bei der Aufbereitung und der Formgebung auftretenden Verformung.

Besonders gefährlich sind Orientierungserscheinungen der Tonmineralien, wenn es bei der Formgebung zu keiner gleichmäßigen Verformung über den gesamten Radius und Umfang des Rohlings kommt und sich Orientierungszonen ausbilden, die ein insgesamt inhomogenes Spannungsfeld hervorrufen. In diese Kategorie gehören zum Beispiel die S-Texturen beim Strangpressen, die durch Orientierung der Partikeln entlang der Schneckenwelle entstehen (s. auch Abschnitt 3.2.3.5.). Aber auch in der Geschirrkeramik treten diese Spannungsfelder auf (s. Abschnitt 3.2.4.4.).

Übersteigen die Spannungen die Festigkeit der Masse, dann treten infolge der ungleichmäßigen, richtungsabhängigen Schwindung bereits in der Rohfertigung die ersten, oftmals nicht sichtbaren Risse auf. Besitzt die Masse insgesamt eine ausreichende Festigkeit, »friert« dieser Spannungszustand ein, und erst mit dem teilweisen Erweichen der Masse beim Brennen lösen sich die Spannungen, und krumme Artikel oder Risse sind die Folge.

Das Ziel der Formgebung muß es in jedem Falle sein, eine *homogene*, wenn auch – wie begründet – anisotrope Textur anzustreben. Das setzt zunächst voraus, daß die zur Verarbeitung kommende Masse selbst homogen im Sinne einer vollkommenen Vermischung von plastischen und unplastischen Bestandteilen sowie der Feuchtigkeitsverteilung ist.

Beim Ausformvorgang selbst kommt es darauf an, eine gleichmäßige Verformung in allen Zonen zu bewirken, da zwischen der Verformung und der sich ausbildenden Anisotropie eine direkte Abhängigkeit besteht. Das bedeutet, daß Zonen, die einer stärkeren Verformung unterliegen, anisotroper sind als solche, die weniger stark verformt werden.

Die Inhomogenität der Masse und eine ungleichmäßige Verformung während der Formgebung sind die Hauptursachen für die Rißbildung und das Verziehen der Artikel. Auch wenn vielleicht eine ungeeignete Trocknung oder Brennführung die Spannungen erst wirksam werden läßt, muß dennoch die durch die Formgebung bedingte Anfangsspannung als die eigentliche Ursache für Risse und Deformationen der Erzeugnisse angesehen werden. Ungeeignete Trocknung oder Brennführung bewirken lediglich, daß sich die vorhandenen Spannungen so sehr vergrößern, bis sie schließlich die Festigkeit der Masse übersteigen [122].

Die für die keramische Praxis so bedeutende Erscheinung der Texturen war immer wieder Anlaß für die Untersuchung der Fließeigenschaften plastischer Massen. In der Regel werden hierfür Rotationsviskosimeter spezieller Bauart verwendet [123 bis 126]. Die mit dieser Meßanordnung erzielten Ergebnisse lassen sich allerdings nur bedingt auf die realen Strömungsverhältnisse bei der keramischen Formgebung plastischer Massen übertragen. Strenggenommen gelten sie nur für die parallele Schichtenströmung im *Couette*-Spalt. Die wichtigsten Ergebnisse aus diesen Versuchen sind die Kenntnisse über das Zusammenwirken von Scherspannung, Verformungsgeschwindigkeit und Ausbildung der Textur. In erster Näherung kann die plastische Masse als eine strukturviskose Flüssigkeit, s. Abschnitt 2.4.2., aufgefaßt werden, für die Gl. (2.15), *Bingham*-Fließen, gilt:

$$\tau = \tau_0 + \eta^* \frac{dv}{dn} \qquad \text{(nach (2.15))}.$$

Bei realen keramischen Massen sind die Fließkurven – wie bei den Gießschlickern – gekrümmt und haben in der Regel einen pseudoplastischen Anstieg, das heißt, nach *Schulze* und *Kästner* [26], ein quasiplastisches Fließverhalten (Bild 2.13, S. 29). Nur extrem magere Massen verhalten sich gelegentlich dilatant.

Nach Bild 2.13 setzt die Deformation der bildsamen Masse erst ein, wenn die Schubspannung die Größe τ_0, den sogenannten Anlaßwert, überschreitet. In Abhängigkeit vom Wasser- und Elektrolytgehalt liegt der Schubspannungsanlaßwert in einer Größenordnung von 10 bis 100 kPa [127, 128]. Dieser Anlaßwert ist die entscheidende Voraussetzung für die bleibende Verformung, denn jeder Formling würde im Falle eines fehlenden Anlaßwertes unter seinem eigenen Gewicht deformieren.

Für die eigentliche Verformung ist die Abnahme von η^* mit zunehmender Deformationsgeschwindigkeit von Interesse.

Haase und *Petermann* [123] stellten $\eta^* = f\left(\frac{dv}{dn}\right)$

für Freiberger Porzellanmasse dar und ermittelten den Bereich der geringsten, nahezu konstanten Viskosität mit $\eta^* \approx 200$ Pa s bei einem Schergeschwindigkeitsgefälle von $\frac{dv}{dn} \approx 600\ s^{-1}$.

Bei diesen Parametern verhielt sich die plastische Masse im Rotationsviskosimeter wie eine echte Flüssigkeit. *Haase* und *Petermann* [123] leiteten daraus die Forderung ab, daß die Formgebung möglichst schnell, d. h. mit hoher Scherrate, erfolgen muß, wenn durch gleichmäßig einsetzendes Fließen die Ausbildung von Texturspannungen weitgehend vermieden werden soll. Das Vorliegen eines homogenen Kontinuums bei hoher mittlerer Schergeschwindigkeit wurde auch von *Schlegel* [126] im Rotationsviskosimeter experimentell nachgewiesen.

Hohe Deformationsgeschwindigkeiten haben nicht nur einen Einfluß auf die Viskosität. Auch die Zugfestigkeit σ_Z und damit das Rißbildungsverhalten der Masse werden durch die Deformationsgeschwindigkeit beeinflußt. Es gilt als bewiesen, daß keramische Formlinge um so weniger rißanfällig sind, je höher die Deformationsgeschwindigkeit bei der Verformung der Masse ist. Diese Tatsache wird bei der Rollerformgebung (s. Abschnitt 3.2.4.) bewußt ausgenutzt, indem man möglichst hohe Differenzgeschwindigkeiten zwischen Rollerkopf und Spindel anstrebt. Ebenso ist das Strangpressen sehr dünnwandiger Rohre erst ab einer bestimmten Geschwindigkeit möglich [11].

Die eigentliche Ursache für die Ausbildung von Texturen muß darin gesehen werden, daß die keramische Masse ein heterogenes Gemisch aus verschiedenen Rohstoffen mit breit gefächertem Körnungsband und unterschiedlichen Kornformen darstellt, das nicht nur *eine* Fließgrenze (Anlaßwert) besitzt, sondern eine ganze Fließgrenzenverteilung. Dieser Tensorcharakter [128] der Fließgrenze bewirkt bei einer langsamen Verformung eine Sortierung der verschiedenen Bindungselemente zwischen den Rohstoffpartikeln, wobei zunächst die schwächeren und später die stärkeren Bindungen überwunden werden. Bei einer plötzlichen, schnellen Verformung bleibt keine Zeit für die Ausbildung diskreter Gleitebenen, und das Absinken der Strukturviskosität auf einen konstanten Minimalwert schafft die Voraussetzung für ein gleichmäßiges Fließverhalten.

Der Zusammenhang zwischen Deformationsgeschwindigkeit, Gleitebenenbildung und Rißempfindlichkeit zeigt, daß das Homogenitätsprinzip nicht nur für die Masseaufbereitung, sondern auch für die Formgebung von Bedeutung ist. Die Eigenschaften der plastischen keramischen Masse verlangen die Gewährleistung einer schnellen und über den gesamten Querschnitt gleichmäßigen Verformung.

3.2.2. Verflüssigungsmittelhaltige bildsame Massen

Die Einführung der Sprühkornaufbereitung in der keramischen Industrie und die damit verbundene Verflüssigung des Sprühschlickers haben Änderungen der Eigenschaften der plastischen Masse bewirkt. Wenngleich die unter Abschnitt 3.2.1. genannten Anforderungen an die plastische Masse grundsätzlich auch für verflüssigungsmittelhaltige Rollermassen gelten, so muß man für die Formgebung dennoch einige Besonderheiten berücksichtigen.

Wie bei der Herstellung von Gießschlicker wird mit der Aufbereitung des Sprühschlickers die Masse aus Gründen der Ökonomie, insbesondere zur Senkung des spezifischen Energieverbrauches des Sprühtrockners, verflüssigt. Bei den Tonmineralien, die – bedingt durch die Härtebildner im Grundwasser oder durch das Schlämmen des Kaolins – ursprünglich mit Ca^{2+}- neben wenigen Mg^{2+}-Ionen belegt sind, erfolgt ein Austausch der Calcium- und Magnesiumionen durch die Kationen des Verflüssigungsmittels, s. Tabelle 2.1. Im Falle der Verflüssigung mit Soda und Wasserglas erhalten die Tonminerale eine Na^+-Ionen-Belegung. Damit ändern sich wesentliche Eigenschaften der Masse, wie z. B. die Gerüstfestigkeit, der Anmachwassergehalt und die Trockenbruchfestigkeit. Die Ursachen hierfür liegen darin begründet, daß die Eigenschaften der verflüssigungsmittelfreien, Ca^{2+}-belegten Masse aus der Kartenhausstruktur resultieren, während bei der verflüssigungsmittelhaltigen Masse isolierte Tonmineralien mit starker Tendenz zur Paralleltextur die Eigenschaften bestimmen, s. Abschnitte 2.3.1. und 2.3.2.

Wie groß der Einfluß der Kationenbelegung ist, zeigen Untersuchungen von *Hofmann* [37]. Für

Tabelle 3.1. Eigenschaften von keramischen Rohlingen bei verschiedener Kationenbelegung der bildsamen Massebestandteile [37]

Austauschfähige Kationen		Volumen-% Feststoff	Trocken-biege-festigkeit	Trockenschwindung der Stäbe		Pfefferkorn-plastizität[1])
mögliche Gesamtmenge in mval/100 g	davon belegt durch in mval/100 g		in MPa	Länge in %	∅ in %	in g H_2O je 100 g trockener Kaolin
1	2	3	4	5	6	7
8,7	8,2 Mg^{2+}	58,3	1,64	6,2	6,2	43,5
8,7	7,2 Ca^{2+}	58,8	1,88	6,2	6,2	41,5
7,0	4,85 Na^{+}	61,4	4,42	4,4	10,2	36,0

[1]) bei Stauchung von 40 auf 16 mm

seine Versuche verwendete er Zettlitzer Kaolin, der mit verschiedenen austauschfähigen Kationen belegt und elektrolytfrei gewaschen wurde. Der so gewonnene Kaolin wurde in einer Strangpresse zu Stäben geformt und bei 40 °C getrocknet. Einen Auszug aus den Meßergebnissen zeigt Tabelle 3.1. Die Na^+-Belegung beeinflußt alle keramischen Eigenschaften. Das Verhältnis Volumen/Feststoff verdeutlicht, daß eine verflüssigungsmittelhaltige bildsame Masse einen geringeren Anmachwassergehalt benötigt bzw. nicht so viel Wasser einbinden kann wie die verflüssigungsmittelfreie. Schwindung und Trockenbiegefestigkeit stehen in engem Zusammenhang mit der Orientierung der Teilchen. Daraus folgt, daß die Schwindung für den Na^+-belegten Kaolin in Strangrichtung (Spalte 5 in Tabelle 3.1) geringer als senkrecht dazu (Spalte 7) ist.

Etwas anders verhalten sich verflüssigungsmittelhaltige bildsame keramische Massen unter Produktionsbedingungen. Die Bilder 3.21 und 3.22 zeigen den Schwindungs- und Trockenbiegefestigkeitsverlauf einer mit Soda und Wasserglas verflüssigten Porzellanmasse in Abhängigkeit von der Feuchte [129]. Die für die Messungen verwendeten Probekörper wurden mit einer Harfe aus einem Massehubel herausgeschnitten; der eine Teil der Stäbe in Strangrichtung und der

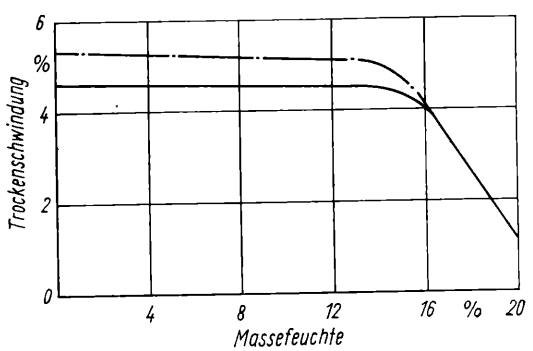


Bild 3.21. Schwindungsverlauf einer stranggepreßten, verflüssigungsmittelhaltigen Porzellanmasse in Abhängigkeit von der Feuchte

-.- Probekörper in Strangrichtung herausgeschnitten
—— Probekörper senkrecht zur Strangrichtung herausgeschnitten

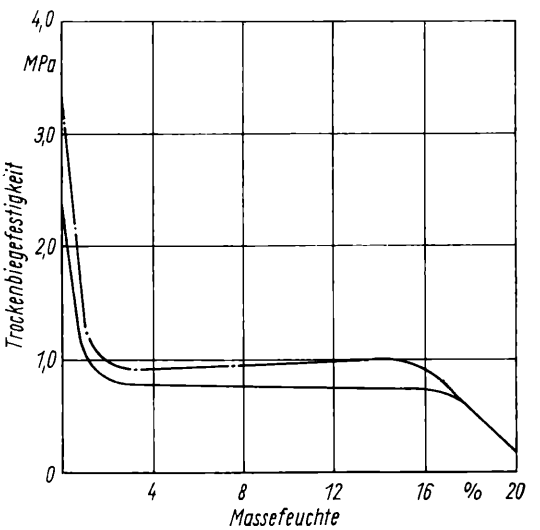


Bild 3.22. Trockenbiegefestigkeit einer stranggepreßten, verflüssigungsmittelhaltigen Porzellanmasse in Abhängigkeit von der Feuchte

– · – Probekörper in Strangrichtung,
—— Probekörper senkrecht zur Stangenrichtung herausgeschnitten.

andere Teil senkrecht dazu. Für die Schwindung ergibt sich die Aussage, daß diese in Strangrichtung größer als senkrecht dazu ist. Das scheint zunächst ein Widerspruch zum Ergebnis nach Tabelle 3.1 zu sein. Berücksichtigt man aber das Fließverhalten der Masse sowie die richtungs- und ortsabhängige Verdichtung beim industriellen Strangpressen, dann wird deutlich, daß hier andere Verhältnisse herrschen als bei den Laboruntersuchungen mit Kaolin [37]. Des weiteren wird die Anisotropie in der Schwindung durch die groben Bestandteile Feldspat und Quarz, die etwa 50 % des Versatzes ausmachen, behindert.

Daß die Vorzugsorientierung dennoch vorhanden ist, zeigt der Trockenbiegefestigkeitsverlauf, wonach die in Strangrichtung herausgeschnittenen Proben eine höhere Festigkeit besitzen als die senkrecht dazu. Der Festigkeitsverlauf nach Bild 3.22 ist durch einen Festigkeitsanstieg zwischen 20 und 16 % Feuchte und einen weiteren unterhalb 1 % Feuchte gekennzeichnet. Während der erste mit der Schwindung korrespondiert und auf die Bildung von Festkörperbrücken und formschlüssigen Bindungen zurückzuführen ist, kommt es zum zweiten Anstieg erst nach dem Ausheizen von physi- und chemisorbierten Wasserhüllen, also nach dem Trocknen bei 105 °C.

Die durch die Verflüssigung des Sprühschlickers bewirkte höhere Festigkeit der Rohlinge kann für das maschinelle Umsetzen und Verputzen von Vorteil sein, wenn die Erzeugnisse nach der Weißtrocknung eine entsprechende geringe Restfeuchte aufweisen.

Von Bedeutung für die Praxis, z. B. bezüglich des Energiebedarfs beim Trocknen, ist auch die eingangs genannte Tatsache, daß die verflüssigungsmittelhaltige Masse einen geringeren Anmachwassergehalt besitzt. Bei Porzellanmassen beträgt die Verringerung etwa 2 %.

Einen weiteren Unterschied zwischen einer verflüssigten und einer unverflüssigten bildsamen Porzellanmasse zeigt das Kraft/Weg-Diagramm, s. Bild 3.23, bei Beanspruchung auf Biegezug und einer Feuchte von 18,5 %. Während die unverflüssigte Masse bei Einwirkung der Kraft bereits die typischen Eigenschaften eines spröden Körpers zeigt, verfügt die verflüssigungsmittelhaltige noch über gute Fließeigenschaften.

Bei der Verarbeitung verflüssigungsmittelhaltiger Massen ist unbedingt auf eine stabile Verflüssigung zu achten, da jede Unter- oder Überverflüssigung bei konstantem Wassergehalt eine andere Massekonsistenz zur Folge hat. Dies ist besonders problematisch, weil auch die Feuchtetoleranz für den Verarbeitungsbereich verflüssigungsmittelhaltiger, bildsamer Massen geringer als bei Massen mit ausgeprägter Kartenhausstruktur ist, s. auch Bild 2.18. Insbesondere ist darauf zu achten, daß keine den Verflüssigungsmechanismus störenden Fremdionen in den Massekreislauf gelangen, wie z. B. Ca^{2+} durch Gipsformreste [130].

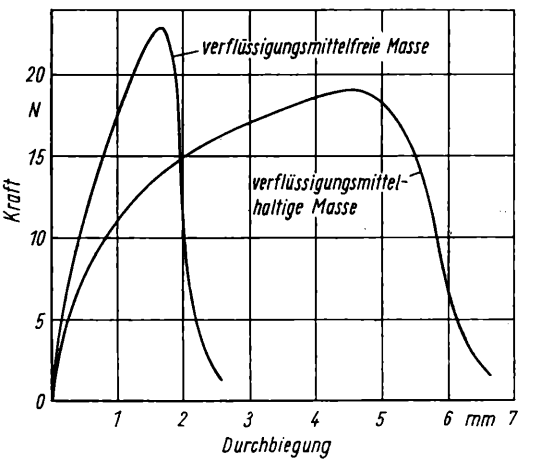


Bild 3.23. Kraft/Weg-Diagramm für verflüssigte und unverflüssigte bildsame Porzellanmassen

3.2.3. Strangpressen

3.2.3.1. Verfahrenstechnische Lösungen und Anwendungsbreite der Strangformgebung

Bei der Verarbeitung nahezu aller bildsamen keramischen Massen ist die Strangpresse die zentrale Formgebungsmaschine. Als *Vorstufe* für einen weiteren Formgebungsprozeß dient sie zum Ziehen von Hubeln für die Geschirr- und Elektrokeramik oder zur Erzeugung von Massebatzen, die durch Nachpressen, z. B. in Revolverpressen, oder durch Stampfen und Naßpressen weiterverarbeitet werden.

Für die Herstellung von Baukeramikerzeugnissen, wie Spaltplatten, Mauer- und Dachziegeln sowie Drain- bzw. Steinzeugrohren, sind sie in der Regel das *eigentliche* Formgebungsaggregat. Aber auch Ferrite, Korundkeramik, Carbide u. a. werden unter Zugabe von Plastifizierungsmitteln (z. B. Tylose, Polyvinylalkohol) zu Profilsträngen und Rohren verpreßt. So sind Strangpressen für die Herstellung von Schutz- und Kapillarrohren, Substraten aus Korund oder Ferritantennenstäben nicht mehr wegzudenken.

Der Arbeitsweise von Strangpressen können verschiedene technische Lösungen zugrunde liegen. Im wesentlichen kann man unterscheiden:

- Schneckenpressen,
- Walzenpressen,
- Kolbenpressen,
- Scheibenpressen.

Die größte industrielle Bedeutung hat die *Schneckenpresse*. Sie wird seit über 100 Jahren in der Keramik eingesetzt und ist heute in nahezu allen Industrieländern zur Massenproduktion von Keramikartikeln zu finden. Zum Zwecke der Verbesserung von Bildsamkeit, Dichte und Homogenität sowie zur Vermeidung von Lufteinschlüssen in der Masse sind die meisten Schneckenpressen als Vakuumstrangpressen ausgeführt.

Nach der Massekonsistenz werden Strangpressen unterschieden für

- die Weichverpressung,
- die Halbsteifverpressung,
- die Steifverpressung.

Einen Überblick bezüglich der dazugehörigen Masseparameter und des dabei auftretenden Preßdruckes zeigt Tabelle 3.2.

Schneckenpressen gibt es in einer Vielzahl von Ausführungen. Nach der Lage der Schneckenwelle und nach speziellen verfahrenstechnischen Gesichtspunkten kann man unterscheiden zwischen [132]

- liegenden Pressen (horizontal laufender Strang),
- stehenden Pressen (vertikal laufender Strang),
- Vakuumpressen mit Evakuierungsteil im Preßzylinder,
- Vakuumaggregaten oder Vakumaten mit Einwellen- oder Doppelwellenmischer, gesonderter Vakuumkammer und Pressenteil,

Tabelle 3.2. Kennwerte von Strangpreßverfahren bei verschiedener Massekonsistenz [131]

Kenngröße	Weichverpressung	Halbsteifverpressung	Steifverpressung
Preßfeuchte, %	27...20	20...15	15...12
Deformationsverhältnis $h_0:h_1$	2,8...1,8	1,8...1,3	1,3
Schubspannungsanlaßwert, kPa	29...48	48...102	102
Preßdruck, MPa	0,4...1,4	1,4...2,5	2,5...5,0

- Schneckenpressen zur Heißformgebung, s. Abschnitt 3.2.3.3., mit Einleitung von Wasserdampf in den Mischerteil oder in die Vakuumkammer.

Eine Einteilung der Schneckenpressen unter Einbeziehung des Zylinderinnendurchmessers zeigt Tabelle 3.3 [133].

Von untergeordneter Bedeutung sind die Walzen- und die Kolbenpressen. Die Arbeitsweise der *Walzenpressen* beruht darauf, daß die Masse zwischen zwei gegenläufigen Walzen in das für die Formgebung vorgesehene Mundstück gedrückt wird. Die zur Verarbeitung gelangende Masse ist weich und der Energiebedarf dieser Pressen entsprechend gering.

Das Arbeitsprinzip der *Kolbenpresse* besteht darin, daß ein im Preßzylinder geführter Kolben die Masse verdichtet und durch das Mundstück hindurchdrückt. Indem der Kolben nach dem Auspressen zurückstößt, um neue Masse zwischen Mundstück und Kolben aufnehmen zu können, ergibt sich ein stoßweiser Vorschub des Massestranges.

Die *Scheibenpresse* ist eine Neuentwicklung. In der BRD wird sie seit 1972 eingesetzt [132]. Bei dieser Presse wird die Masse kontinuierlich aufgegeben. Eine Glattwalze und eine gegenläufige Scheibenwalze, die beide in einem Gehäuse gelagert sind, erfassen das Material und fördern es über feststehende Abstreichkeile in einen Preßrumpf, wobei die Masse verdichtet und über Preßkopf und Mundstück zu einem endlosen Strang verformt wird. Die Presse ist als Vakuumaggregat für weich- und steifplastische Formgebung einsetzbar. Nach Angaben des Herstellers soll der Formling texturärmer sein.

Tabelle 3.3. Einteilung und Anwendung der Schneckenpressen [133]

Maschine	Zylinder-innen-durchmesser in mm	Anwendung	Herzustellendes Produkt
Horizontalpressen			
Einschneckenpressen mit und ohne Vakuumerzeugung	200 250 350 450	Grobkeramik	Voll- und Hohlstränge, Verarbeitung gut aufbereiteter Massen
		Feinkeramik	Homogenisierung und Entlüftung von Drehmassen, Voll- und Hohlhubeln
Zweischneckenpresse mit und ohne Vakuumerzeugung	100, 200 250, 350 450, 560 630, 750	Grobkeramik	blasenfreier, homogener Strang, Herstellung von Hohlsträngen
		Feinkeramik	Drehmassen, Voll- und Hohlhubel
		techn. Keramik	Voll- und Hohlhubel
Dreischneckenpresse mit und ohne Vakuumerzeugung	450 560	Grobkeramik	blasenfreier, homogener, steifplastischer Strang, vorteilhafte Herstellung von Hohlsträngen
		techn. Keramik	steifplastischer Strang, Voll- und Hohlhubel
Vertikalpressen			
Einschneckenpresse mit Vakuumerzeugung	350 450 630	Grobkeramik	Kanalisationssteinzeug mit oder ohne Muffe, Nennweite 100...1000 mm, Baulänge bis 2000 mm, Formstücke
Zweischneckenpresse mit Vakuumerzeugung	350 450 630	Grobkeramik	Kanalisationssteinzeug
		techn. Keramik	Voll- und Hohlhubel, Profilstränge
Dreischneckenpresse mit Vakuumerzeugung	1200 1600	techn. Keramik	Voll- und Hohlhubel, Strangdurchmesser bis 2000 mm

3.2.3.2. Aufbau von Schneckenpressen und Funktionsprinzip

Den prinzipiellen Aufbau und die Wirkungsweise einer Zweischneckenvakuumpresse zeigt Bild 3.24. Die zur Verarbeitung kommende Masse gelangt über die Einzugs- oder Einräumerwalze (*5*) in die Presse. Ähnlich wie bei einem Fleischwolf wird die Masse von Preßschnecken (*7* und *16*) durch die Zylinder (Gehäuse *6* und *15*) bewegt. Diese Schnecken sind Schrauben, die das zu verpressende Material bei Drehbewegung entsprechend der Steigung und der Drehzahl der Schraube transportieren. Damit die Masse nicht an der Schraube haftet und mitrotiert, sind die

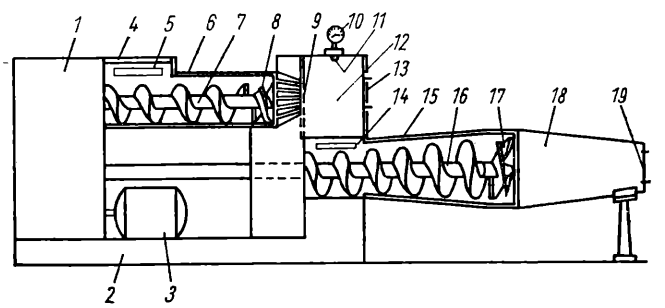


Bild 3.24. Vakuumschneckenpresse [92]

1 Getriebekasten, *2* Gestell, *3* Motor, *4* Aufgabetrichter, *5* Einräumerwalze, *6* Gehäuse für Aufgabeschnecke, *7* Aufgabeschnecke, *8* Kleeblattmesser, *9* Schlitzplatte, *10* Manometer, *11* Lampe, *12* Vakuumkammer, *13* Schauglas, *14* Einräumer, *15* Gehäuse für Austragsschnecke, *16* Preß- oder Austragsschnecke, *17* End- oder Kleeblattmesser, *18* Preßkopf, *19* Mundstück

Innenflächen der Preßzylinder durch facettenartige Vertiefungen angerauht.

Zwischen der ersten Förderschnecke und der zweiten befindet sich eine Schlitzplatte (*9*), durch die die Masse in die Vakuumkammer (*12*) gedrückt wird. Eine Verjüngung zwischen dem ersten Zylinder (*6*) und der Schlitzplatte (*9*) bewirkt die Verdichtung der Masse und schafft die Voraussetzung für eine Evakuierung. Die Entlüftung der Masse in der Vakuumstrangpresse beruht auf der Tatsache, daß die bildsame Masse absolut gasundurchlässig ist. Eine Abdichtung gegenüber der Atmosphäre erfolgt somit durch die Masse selbst. Für die Verbesserung der Entlüftung der Masse bedeutet das, daß diese in möglichst kleine Stücke zerteilt werden muß. Legt man z. B. einen Massebatzen in einen Vakuumrezipienten, dann platzen nur die Gasblasen auf, die nicht mehr als 1 bis 3 mm von der Oberfläche entfernt in der Masse liegen [134].

Das Vakuum in der Vakuumkammer wird z. B. durch Wasserringpumpen erzeugt und beträgt bis zu 96 % des absoluten Vakuums. Ein größeres Vakuum ist nicht zweckmäßig, da sonst gleichzeitig das Wasser verdampft (s. Abschnitt 3.2.3.3.).

Die entlüfteten Massenudeln werden von einem Einräumer (*14*) erfaßt und der mit entgegengesetztem Drehsinn laufenden Preßschnecke (*16*) zugeführt. Über diese wird die Masse aus dem Preßzylinder durch den Preßkopf (*18*) und das Mundstück (*15*) gepreßt.

3.2.3.3. Grundlegende Zusammenhänge beim Schneckenpressen

Grundlegende theoretische Arbeiten zur Wirkungsweise von Schneckenpressen wurden von *Hallmann* [115, 135] und *Pels Leusden* [136 bis 139] veröffentlicht.

Das charakteristische Maschinenelement der Schneckenpresse ist die im Preßzylinder rotierende Schnecke. Sie hat die Aufgabe, die keramische Masse zu transportieren und zu verdichten. Die Transportfunktion der Schnecke kann, gemäß Bild 3.25, mit den Geschwindigkeitsvektoren $\vec{v}_Z$, $\vec{v}_S$, $\vec{v}_M$ und $\vec{v}_{ax}$ beschrieben werden [11]. Die Relativgeschwindigkeiten zwischen Material und Zylinder $\vec{v}_Z$ sowie der Schnecke $\vec{v}_S$ ergeben

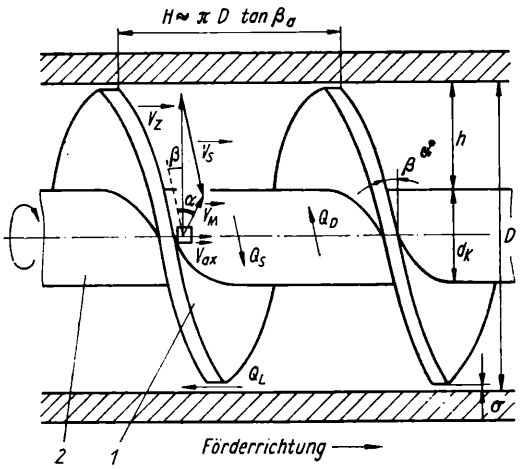


Bild 3.25. Kenngrößen der Schnecke und Geschwindigkeitsvektoren für den Massepartikeltransport im Preßzylinder [11]
1 Schneckenflügel, *2* Nabe

den Materialflußvektor $\vec{v}_M$. Dieser Materialflußvektor $\vec{v}_M$ bildet zur Schneckenflanke den Winkel α, der auch als Materialwinkel bezeichnet wird. Die Förderleistung einer Schneckenpresse wird durch die Axialkomponente $\vec{v}_{ax}$ des Vektors $\vec{v}_M$ bestimmt. Sie ist am größten, wenn die Masse in tangentialer Richtung ruht, und ist am geringsten, wenn sich die Masse mit der gleichen Umfangsgeschwindigkeit wie die Schnecke dreht. Aus diesem Grunde ist man bemüht, den Preßzylinder durch spiral- oder facettenartige Vertiefungen oder gelochte Zylindereinsätze möglichst rauh zu gestalten. Andererseits muß die Haftreibung zwischen der Schnecke und der Masse möglichst gering sein, damit das von der Schneckenflanke ausgeübte Drehmoment möglichst klein wird. Das heißt, daß die Oberfläche der Schnecke möglichst glatt sein muß. Trotz Aufrauhung des Preßzylinders und glatter Schnecken läßt sich, wie die Praxis zeigt, eine gewisse Schleppwirkung parallel zu den Schneckenflanken nicht vermeiden. Diese Erscheinung ist ein Grund für den sogenannten Schlupf, dessen Folge eine Verringerung der Fördergeschwindigkeit gegenüber der theoretisch möglichen ist.

Die Verdichtungsfunktion der Schnecke verdeutlicht Bild 3.26. Bedingt durch den Reibungs- und Verformungswiderstand wird über der

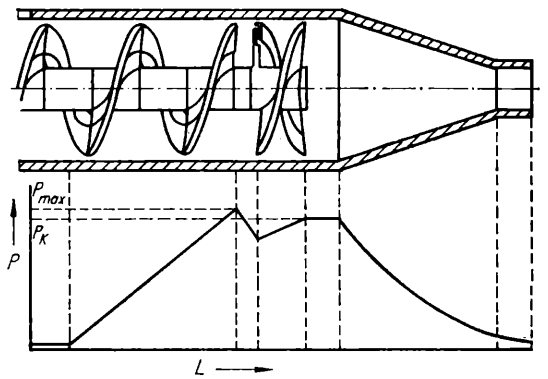


Bild 3.26. Druckverlauf p über der Länge L in einer Schneckenpresse [115]

Masse ein Druck aufgebaut, der sie gleichzeitig verdichtet. Für eine Schnecke mit zweigängiger Endschnecke ergibt sich nach *Hallmann* [115] der in Bild 3.26 ausgewiesene prinzipielle Kurvenverlauf.

Für die Praxis ist der Preßkopfdruck p_K von Bedeutung, der bei einem gegebenen Pressentyp durch die Masseeigenschaften und durch die Geometrie von Preßkopf und Mundstück beeinflußt wird. Sowohl der Einfluß der Preßkopfgeometrie als auch der der Mundstücksgeometrie läßt sich berechnen [140]. Als Beispiel sei hier die Abhängigkeit des Preßkopfdruckes p_K vom Nennquerschnitt A des Mundstückes aufgezeigt (Bild 3.27). Dieses Kennlinienfeld beantwortet eine im Ziegelwerk alltäglich auftretende Frage, nämlich, wie sind die Auswirkungen auf p_K bei wechselnder Materialfeuchte und bei Umstellung auf ein anderes Format?

Für das Betreiben von Schneckenpressen ist neben dem Preßkopfdruck vor allem die Durchsatzleistung relevant. Anhand von Bild 3.25 wurde bereits gezeigt, daß die theoretische Durchsatzleistung durch die Schleppwirkung der Schnecke nicht erreicht werden kann. Bedingt durch die Massekonsistenz und den Druckgradienten im Preßzylinder (Bild 3.26), kommt es außerdem noch zu einem Druckfluß und einem Leckfluß in Richtung Vakuumkammer.

Die resultierende Gesamtströmung in der Schneckenpresse ergibt sich aus den Einzelströmungen (s. Bild 3.25):

- Schleppfluß (Förderströmung) Q_S,
- Druckfluß (Rückströmung) innerhalb des Preßzylinders Q_D,
- Leckfluß (Rückströmung) im Spalt zwischen Schnecke und Zylinderwand Q_L.

Da Druckfluß und Leckfluß der Förderrichtung entgegengesetzt sind, vermindern sie, ebenso wie die Schleppwirkung der Schnecke, den Durchsatz der Anlage. Bei Vernachlässigung des Druck- und Leckflusses, der Schleppwirkung der Schnecke und der Flankenstärke ergibt sich nach *Pels Leusden* [136] der theoretische Durchsatz einer Schneckenpresse:

$$\dot{V}_{max} = \frac{\pi^2 D_S^3}{4} \left(1 - \frac{d_K^2}{D_S^2}\right) n \sin\beta \cos\beta \qquad (3.11)$$

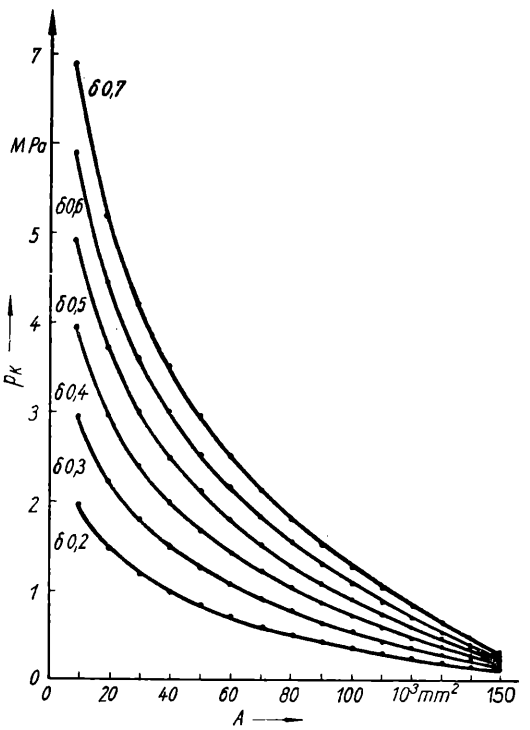


Bild 3.27. Preßkopfdruck p_K in Abhängigkeit vom Nettoquerschnitt A des Mundstückes [140]

(nach *Hallmann*, für die Parameter: Preßkopfdurchmesser D = 500 mm, Preßkopflänge l = 500 mm, Reibung μ = 0,6, Fließgrenzenwerte δ = 0,2 bis 0,7 N mm^{-2})

$\dot{V}_{max}$ max. theoretischer Durchsatz
D_S Schneckendurchmesser
d_K Nabendurchmesser
β mittlerer Schneckensteigungswinkel
n Drehzahl der Schnecke.

Vom theoretischen Wert $\dot{V}_{max}$ werden in der Praxis nur 10 bis 40 % erreicht. Diese deutliche Diskrepanz zwischen theoretischem und praktischem Durchsatz zeigt, daß die einzelnen Massesströmungen, das heißt, die Relativbewegungen in der Masse, ein erhebliches Ausmaß erreichen müssen. Damit erklärt sich auch die Tatsache, daß die Schneckenpresse nicht nur ein Formgebungs- sondern auch ein Homogenisierungsaggregat ist, das Inhomogenitäten in der Masse weitgehend abbaut.

3.2.3.4. Aufbereitungseffekte und keramische Probleme bei der Formgebung mit Schneckenpressen

Die Festlegung, welche Schneckenpresse für welchen Einsatz vorgesehen wird, ist im wesentlichen eine Frage des Rohstoffes und des herzustellenden Erzeugnisses. Etwa 90 % der Anlagen in der Ziegelindustrie arbeiten als Vakuumaggregate, d. h. als Kombination von Doppelwellenmischer und Vakuumschneckenpresse. Schnekkenpressen ohne Evakuierungsvorrichtung werden eigentlich nur noch für extrem bildsame Massen und zur Herstellung kleinerer Formate, 1 NF bis etwa 2,4 NF mit einem Hohlraumanteil bis 20 %, eingesetzt. In nahezu allen anderen Bereichen der keramischen Industrie wird eine Verbesserung der Bildsamkeit durch Anwendung des Vakuums gefordert. In der Masse eingeschlossene Luft wirkt wie ein »Magerungsmittel«. Indem der Masse durch die Evakuierung die Luft entzogen wird, erhöht sich die Bildsamkeit der Masse, und die Texturanfälligkeit der Erzeugnisse wird reduziert. Äußerlich zeigt sich diese Erscheinung in einer zähen, »gummiartigen« Strangkonsistenz [132]. Die Vakuumpressen ermöglichen damit die Herstellung höherwertiger Erzeugnisse bei entsprechenden Rohstoffen, d. h. geringere Stegdicken, bessere Festigkeiten bzw. homogenere und texturärmere Hubel.

Die Einstellung des Vakuums an der Presse muß auf die Anlagenleistung, die Masseeigenschaften und auf die Belange des herzustellenden Erzeugnisses abgestimmt sein. In der Regel bringt ein möglichst hohes Vakuum die besten Ergebnisse. Ein möglichst hohes Vakuum bedeutet dabei eine Annäherung an den Druck, der dem Dampfdruck des Wassers entspricht, nämlich 2,7 kPa bei Raumtemperatur. Bei einem höheren Vakuum siedet das Wasser der Masse, und sie beginnt auszutrocknen.

Ernste Qualitätsprobleme entstehen, wenn durch Abdichtungsfehler das Vakuum abfällt. In einem solchen Falle kommt es zu einer deutlichen Verschlechterung der Masse- und Erzeugniseigenschaften. Die Texturanfälligkeit und damit die Rißanfälligkeit der Erzeugnisse nimmt erheblich zu; die Masse wird »kurz« und bröcklig. Untersuchungen von *Pels Leusden* [138] an verschiedenen Tonen haben gezeigt, daß es immer einen Bereich der Evakuierungen gibt, in dem die Texturbildung besonders stark ist. Nach Bild 3.28 liegt dieser Bereich bei einem Vakuum zwischen 50 und 82 %. Bei weiterem Abfall des Vakuums nimmt die Texturanfälligkeit wieder ab (zur Definition der Texturzahl s. Abschnitt 3.2.3.6.).

Für die Produktion bedeutet das, daß eine Teilevakuierung beim Strangpressen unbedingt vermieden werden muß. Das Vakuum in der Kammer soll möglichst >90 % sein. Weiterhin muß, insbesondere bei hohen Durchsätzen, gewährleistet sein, daß die geschnitzelte Masse in der Vakuumkammer eine möglichst hohe spezifische Oberfläche aufweist und die in der Masse eingeschlossene Luft auch effektiv in der zur Verfügung stehenden kurzen Zeit aus der Masse entfernt wird. Anderenfalls liegt ebenfalls nur eine Teilevakuierung vor, deren Folge Inhomogenitäten und Texturen sind.

Ein anderer Aufbereitungseffekt, der beim Strangpressen in der Ziegelindustrie ausgenutzt wird, ist die *Heißverformung*. Bei diesem Verfahren wird Sattdampf mit einer Temperatur von 130 bis 150 °C in den Mischerteil des Vakumaten geleitet. Die Bedampfung bietet eine Reihe von Vorteilen, von denen die wichtigsten sind [141]:

- besserer Materialaufschluß mit besserer Verpreßbarkeit und – daraus folgend – einem geringeren Kraftbedarf der Presse,
- verkürzte Trocknungszeit durch Wegfall der Aufheizzeit und sofort einsetzende Verdunstung.

Die Heißverformung wird zur Notwendigkeit, wenn sogenannte Schnelltrockner im Einsatz sind und damit die Aufwärmzeit für das Trok-

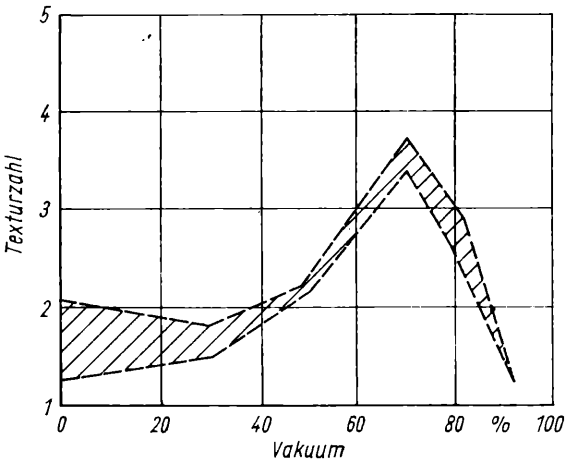


Bild 3.28. Texturzahl in Abhängigkeit von der Evakuierung [138]

kengut entfällt. Aber auch bei schwierig zu trocknenden Vollziegeln kann eine Heißverformung notwendig werden.

Bei der Aufbereitung ist zu beachten, daß der plastischen Masse noch etwa 2 bis 3 % Wasser mit der Dampfeinleitung zugeführt werden. Der Anmachwassergehalt muß demzufolge geringer als bei einem Verpressen ohne Dampf sein. Bei einer hohen Grubenfeuchte ist es manchmal sogar erforderlich, die zu hohe Feuchtigkeit durch Zugabe von Trockenbruch, getrockneter Masse oder fein gemahlenem Kalk zu kompensieren.

Tritt die bedampfte Masse in die Vakuumkammer der Strangpresse ein, beginnt das heiße Wasser im Ton heftig zu verdampfen, da die dem Unterdruck entsprechende Siedetemperatur abgesunken ist. Durch die plötzliche Druckänderung wird darüber hinaus auch noch Wasser aus dem Ton herausgerissen und zerstäubt. Indem dieser Wasserdampfnebel durch die Vakuumpumpe abgesaugt wird, gehen der Masse in der Vakuumkammer wieder etwa 1,5 % Wasser verloren.

Durch diese Effekte und die erhöhte Temperatur in der Vakuumkammer vergrößert sich das abzusaugende Luft/Dampfgemisch-Volumen um ein Vielfaches. Das Vakuum, das bei normaler Verpressung z. B. 96 % beträgt, geht mit steigender Tontemperatur zurück, und man erhält z. B. bei etwa 53 °C Strangtemperatur nur noch etwa 85 % Vakuum [141]. Dieser Abfall des Vakuums hat, wie die Praxis zeigt, keine nachteiligen Folgen. Durch die Heißverformung wird der Ton in kürzester Zeit aufgeschlossen, d. h., die natürlich gewachsenen Strukturen werden zerstört und Spannungen in der zu formenden Masse abgebaut. Indem der Ton leichter fließt, geht außerdem der Verschleiß der Strangpresse zurück.

Die Temperaturen des austretenden Stranges liegen meist zwischen 40 und 65 °C, können aber auch durchaus 90 °C erreichen. Der Dampfverbrauch beträgt 40 bis 90 kg t^{-1} Masse [132].

Bei geeigneten Rohstoffen und richtiger Führung der Trocknung können die Trocknungszeiten erheblich verkürzt und die Erzeugnisqualität verbessert werden. In einigen Fällen wird von einer Bedampfung an der Strangpresse abgeraten, weil bei einigen Tonsorten eine Verschlechterung der Bindekraft festgestellt wurde [142].

Die Entscheidung, ob eine *Weichverpressung*, *Halbsteif-* oder *Steifverpressung* zur Anwendung kommt, richtet sich in erster Linie nach dem Rohstoffvorkommen und den herzustellenden Erzeugnissen. So sind magere Massen für eine Steifverpressung noch gut geeignet, während sie bei einer Weichverpressung bereits Schwierigkeiten bereiten. Umgekehrt werden Tone, die ständig eine hohe Grubenfeuchte besitzen, durch Weichverpressung oder sogar im Streichverfahren (s. Abschnitt 3.2.5.1.) verarbeitet.

Bei der Steifverpressung wird, bedingt durch die geringere Feuchte des Materials, ein höherer Reibungsdruckverlust verursacht, der anderer-

seits einen höheren Preßdruck zum Verdichten bzw. zur Bindung der Masse erfordert. Die hierbei auftretenden Preßdrücke können bis zu 10 MPa betragen. Schneckenpressen für eine Steifverpressung sind dementsprechend robust konstruiert. Sie werden vorwiegend in liegender Anordnung für Ziegel mit geringem Lochanteil und für Steinzeugrohre ohne Muffen eingesetzt.
Der höhere Energieaufwand für das Pressen und der höhere Verschleiß verschiedener Baugruppen werden durch einen geringeren Energieaufwand für die Trocknung kompensiert. Der eigentliche Vorteil der Steifverpressung besteht aber darin, daß mit diesem Verfahren setzfähige Erzeugnisse produziert werden. Die Setzfähigkeit der Erzeugnisse sofort nach der Formgebung und die höhere Maßhaltigkeit schaffen mit die Voraussetzungen für eine durchgängige Automatisierung in der Grobkeramik. Mit steifer Verpressung kann man gegebenenfalls eine unzureichende Masseaufbereitung kompensieren.
Die steifplastische Formgebung ist, bedingt durch den eingesetzten mageren Schieferton, in Amerika weit verbreitet. In Europa dominiert die weichplastische Formgebung. Zur Herstellung von gemufften Steinzeugrohren auf Vakumaten in stehender Ausführung sowie zur Herstellung von Hubeln für die Feinkeramik wird die weichplastische Formgebung angewendet.

3.2.3.5. Entstehung von Formgebungsfehlern beim Strangpressen

Obgleich die Strangpresse das zentrale und bewährte Aggregat für die Aufbereitung und Formgebung bildsamer Massen ist, gibt es verschiedene Mängel, die auf das Arbeitsprinzip der Schneckenpresse zurückzuführen sind. Die schneckenlosen »Tonpumpen« sind kennzeichnend für das Bestreben, die aus dem Arbeitsprinzip der Schneckenpresse resultierenden Mängel zu beheben.
Das Kernproblem des Strangpressens sind die *Texturen*. Neben der Mikrotextur, die sich durch die parallele Anordnung der Tonmineralien in Fließrichtung einstellt, gibt es Makrotexturen, die die Erzeugnisqualität entscheidend beeinflussen, s. auch Abschnitt 2.6. Besonders unerwünscht sind die von der Schneckenwelle her-

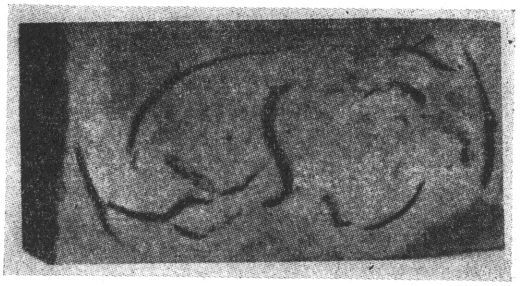


Bild 3.29. S-Texturen

rührenden *S-förmigen* Texturen, die sich korkenzieherähnlich durch den Massestrang ziehen (s. Bild 3.29).
Indem die Schneckenwelle die keramische Masse fördert und verpreßt, übt sie oberflächlich einen glättenden und polierenden Effekt auf die Masse aus. Dieser Glättungseffekt ist die Folge der Relativbewegung zwischen der metallischen Schnekke und der keramischen Masse und damit die Ursache, daß sich die beiden von der Vorder- und Rückseite des Preßflügels geförderten Flächen des Massestranges auch unter dem hohen Druck im Preßkopf nicht wieder »verzahnend« verbinden lassen. Diese Textur ist eine bevorzugte Zone für die Rißbildung beim Trocknen und Brennen. Im Extremfall kann sie bis zur Aufspaltung des Stranges führen, z. B. bei Langstabisolatoren.
Bedingt durch die Kernhalterbügel bei der Herstellung von Lochziegeln oder durch die Halterung der Glocke bei Rohrpressen, wird der Massestrang vor dem Austritt aus dem Mundstück in mehrere Teile aufgespalten (s. Abschnitt 4.2.1.1.). Kommt es anschließend zu keiner »verzahnenden« Verbindung, so treten *Schnitt-Texturen* auf. Weitere Texturen entstehen durch den keineswegs gleichmäßigen Vortrieb der Masse.
Inhomogenitäten, z. B. verschiedene Feuchtigkeitsbezirke im Massestrang, sind die Folge einer unzulänglichen Aufbereitung und können durch die Strangpressen oftmals nicht ausgeglichen werden.
Zu den wesentlichen Oberflächenfehlern, die am Strang auftreten können, gehören die *Drachenzähne*. Drachenzähne treten insbesondere bei der Herstellung von Vollsträngen aus mageren Massen und bei fehlender Evakuierung auf. Die tie-

feren Ursachen für die Entstehung von Drachenzähnen liegen in den unterschiedlichen Reibungsbedingungen von Mundstücksecken und Strangmitte. Die Folge davon ist, daß die Masse in der Strangmitte eine höhere Geschwindigkeit als in den Ecken des Mundstückes aufweist. Da aber für die Erzielung einwandfreier Stränge die Strömungsgeschwindigkeit außerhalb des Mundstückes über den gesamten Querschnitt gleich sein muß, kommt es in den Bereichen, wo nicht genug Masse gefördert wird, zu Zugspannungen, die im Extremfall zum Einreißen des Stranges führen [138]. Magere Massen sind von dieser Erscheinung stärker betroffen, weil sie gegenüber den fetten Massen eine geringere Zerreißfestigkeit aufweisen.

Mit den Drachenzähnen nichts gemein haben *Risse in Strängen*, die auf einen diskontinuierlichen Vortrieb der Schnecke über den Querschnitt zurückzuführen sind. Dieser Strömungsfehler kommt dadurch zustande, daß sich die Masse im Schneckengang selbst nicht gleichmäßig vorwärts schiebt. Der einseitige Verschleiß der Schneckenbeläge ist die Folge davon, daß die Förderung der Masse auf der dem Mundstück zugewandten Seite des Preßflügels durch den höheren Kraftschluß schneller als auf der Rückseite desselben erfolgt. Die dem Mundstück zugewandte Seite des Preßflügels wird auch als Verschleißseite der Schnecke bezeichnet.

3.2.3.6. Erkennen und Beseitigen von Formgebungsfehlern beim Strangpressen

Texturen und andere Formgebungsfehler treten beim Schneckenpressen gleichsam wie bei anderen keramischen Verfahren oftmals erst nach der Trocknung oder dem Brand in Erscheinung. Für die Beseitigung dieser Fehler ist die genaue Kenntnis des Texturverlaufes von größter Wichtigkeit. In der Praxis haben sich verschiedene Methoden bewährt, mit denen der genaue Verlauf fixiert werden kann [132]:

- Auseinanderbrechen des feuchten Formlings, des trockenen Rohlings oder des gebrannten Erzeugnisses in verschiedenen Ebenen sowie Anfertigung von Anschliffen,
- Ausspülen eines Strangstückes oder eines Rohlings mit Wasser bzw. Lagerung unter Wasser,

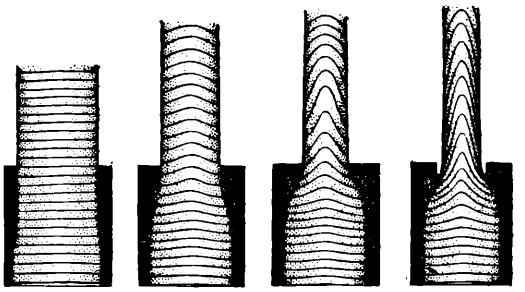


Bild 3.30. Fließtexturen bei Reduzierung des Strangquerschnittes [140]

- Eislinsenbild durch Befrosten frisch gepreßter Strangabschnitte oder Erzeugnisse,
- Evakuierung des Formlings zur Hälfte seines Volumens unter Wasser,
- Zerstörung des Rohlings durch scharfes Trocknen und Auswertung der typischen Rißbilder,
- Abölen der getrockneten Rohlinge zum Sichtbarmachen von Haarrissen,
- Ermittlung der Texturzahl
  (Texturzahl = Verhältnis von Maximal- und Minimalzugfestigkeit im Strang; eine Texturzahl von 1 bedeutet, daß keine Texturen vorliegen).

Durch entsprechende Gestaltung und Anordnung von Bauelementen der Strangpresse können Formgebungsfehler auf ein Minimum beschränkt werden.

Die Rißbildung infolge von *S-Texturen* kann man am besten vermeiden, wenn man den Abstand zwischen der Schneckenendnabe und dem Mundstückseintritt möglichst groß hält.

Schnitt-Texturen lassen sich weitgehend umgehen, wenn Kernhalterbügel und Mundstückseintritt möglichst weit auseinander liegen.

Für die Beseitigung von *Texturen allgemeiner Art*, z. B. solcher, die aus unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten resultieren, gibt es kein grundsätzliches Rezept. Als günstige Maßnahmen haben sich erwiesen:

- Der Einbau einer zweiflügligen engeren Endschnecke; mit dieser Maßnahme wird bewirkt, daß sich die Geschwindigkeitsdifferenzen innerhalb der aus der Schnecke austretenden Masse verkleinern. Aus der geringeren Geschwindigkeitsdifferenz resultieren entsprechend kleinere Relativbewegungen, die zu weniger ausgeprägten Texturen führen [128].

- Bei der Gestaltung von Mundstück und Preßkopf sollte darauf geachtet werden, daß eine zu kurze konische Verjüngung in Fließrichtung die Ausbildung von Texturen stark fördert. Entscheidend für die Vermeidung von Texturen ist eine möglichst geringe Einschnürung der Masse beim Einströmen in das Mundstück, d. h. ein gleichmäßiger Vortrieb über den Strangquerschnitt (s. Bild 3.30, S. 71).
  Der gleichmäßige Vortrieb im Preßkopf läßt sich am einfachsten mit einer Drahtharfe kontrollieren. Dabei wird das Mundstück entfernt und die Drahtharfe vor den Preßkopf gehalten. Die kreuzweise angeordneten Drähte der Harfe teilen den austretenden Massestrang in Teilstränge auf. Anhand der unterschiedlichen Längen der Teilstränge kann man auf die Geschwindigkeitsverteilung schließen und Korrekturen an der Preßkopfströmung vornehmen.
  Bei der Gestaltung von Mundstücken ist zu beachten, daß das Verhältnis von Mundstücklänge L_M zu Mundstückdurchmesser D_M bei $\frac{L_M}{D_M} = 4$ liegen sollte. Bei konischen Mundstücken sollte im Interesse einer geringen Strangrauhigkeit $\frac{L_M}{D_M} = 2$ betragen [143]. D_M bezieht sich auf den Austrittsdurchmesser des Mundstückes.
- Texturmindernd wirkt sich eine Senkung des Füllungsgrades der Schnecke aus, was zu einer geringeren Masseschichtung führt. Feingeschichtete, gleichmäßige Texturen vermindern die Rißanfälligkeit [132].
- Eine falsche Massekonsistenz begünstigt die Ausbildung von Texturen. Eine extrem niedrige Massekonsistenz bewirkt einen schnelleren Vortrieb der mittleren Strangpartien; eine extrem steife Masse verlangsamt den Vortrieb in Strangmitte [132].

Drachenzähne lassen sich weitgehend vermeiden, wenn man dafür sorgt, daß die Masse mit gleichmäßiger Geschwindigkeit über den Strangquerschnitt aus dem Mundstück austritt. Der gleichmäßige Vortrieb ist auch hier mit der Drahtharfe kontrollierbar.
Einen entscheidenden Einfluß auf die Ausbildung von Drachenzähnen hat die Mundstückskonizität. Es besteht die generelle Tendenz, daß sich mit zunehmender Mundstückskonizität die Strangrauhigkeit erhöht.
Außerdem kann man eine gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeit des austretenden Massestranges durch richtig gewählte Konizität des Preßkopfes, durch Gegenmesser und entsprechende Gestaltung der Kernhalterbügel erreichen. Die Einrichtung basiert in jedem Fall auf Erfahrungswerten.
Durch eine Schmierung oder Bewässerung des Mundstückes bei gleichzeitiger Evakuierung lassen sich Drachenzähne ebenfalls weitgehend vermeiden.
Risse durch stoßweisen Vortrieb sind reduzierbar, indem man auf die eingängige Schnecke einen zusätzlichen Schlußflügel montiert, der bei richtiger Stellung den Massestrom der eingängigen Schnecke genau in zwei gleiche Teile aufteilt. Damit wird die Voraussetzung für eine symmetrische Beschickung des Preßkopfes geschaffen [138].

3.2.4. Rollerformgebung

3.2.4.1. Entwicklung des Rollerverfahrens

Mit der Erfindung des Rollerprinzips 1946 wurde die Ablösung der bis dahin in der Geschirrindustrie üblichen Fertigung mittels Quetschschablone – auch als Drehen bezeichnet – eingeleitet. Für die Herstellung rotationssymmetrischer Geschirrartikel ist die Rollerformgebung das dominierende Verfahren geworden, wobei sich der Begriff »Drehen« auch im Standardwerk noch weitgehend erhalten hat. Das Drehen mit der Quetschschablone wird heute nur noch für Sonderartikel oder im handwerklichen Betrieb angewandt. Die entscheidenden Stationen für diese schnelle Entwicklung waren [144]:

1949 die Einführung der Differenzgeschwindigkeit zwischen Spindel und Rollerwerkzeug,
1953 das Abkippen des Rollerwerkzeuges während des Ausformvorganges,
1967 die Entwicklung der Blattquetsche,
1968 die Anwendung des Einformprinzips für Flachgeschirr,
1968 die Einführung des Taktstraßenprinzips.

Diese Entwicklungsstufen und die Einführung weiterer technisch relevanter Lösungen, wie die

Anwendung eines Vorrollers, der Einbau eines Texturzerstörers für den Vakuumstrangpressenteil oder die Einführung des starren, nicht rotierenden Rollerkopfes bei der Becherfertigung (hierbei handelt es sich also nicht mehr um einen Rollerkopf im ursprünglichen Sinne), haben eine Vielzahl von Rollermaschinen hervorgebracht. Das eigentliche Verfahrensprinzip kann man jedoch in Analogie zum Drehen mit der Quetschschablone auf zwei Grundlösungen zurückführen, das *Überformen* und das *Einformen*.
In bezug auf die Bewegungsabläufe von Rollerschablone und Formspindel lassen sich drei Varianten unterscheiden:

- Ausformung durch Absenken des Rollerkopfes bei ortsfester Spindel,
- Ausformung durch Absenken des Rollerkopfes und Anheben der Spindel,
- Ausformung durch Anheben der Spindel bei ortsfestem Rollerkopf.

3.2.4.2. Arbeitsprinzip beim Überformen

Das Prinzip des Überformens besteht darin, daß eine rotierende Vollschablone aus Stahl, auch Rollerkopf genannt, bei gleichläufiger Rotation der Form die aufgelegte Massescheibe in einem Arbeitsgang zu einem fertigen Scherben bzw. Rohling ausformt. Die Unterseite z. B. eines Tellers entspricht dem Profil der Rollerschablone und die Innenfläche des Tellers dem Profil der Gipsform, wie in Bild 3.31 ersichtlich ist. Die Annäherung der arbeitenden Flächen von Roller und Form erfolgt nach jeweils einer der eingangs genannten drei Varianten. Sobald der Rollerkopf das Masseblatt berührt, wird dieses durch

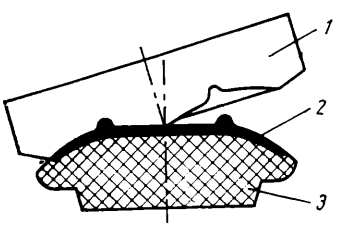


Bild 3.31. Scherbenschnitt mit Rollerwerkzeug und Gipsform
1 Rollerwerkzeug, *2* Scherben, *3* Gipsform

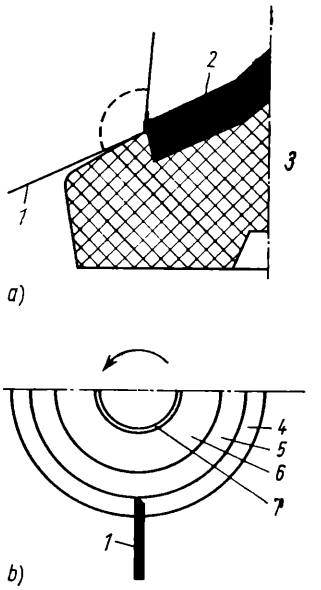


Bild 3.32. Richtige Einstellung des Abschneiders (aus [92])
a) Schnitt
b) Draufsicht
1 Abschneider, *2* Scherben, *3* Gipsform, *4* Schonrand, *5* Tellerfahne, *6* Tellerkessel, *7* Tellerfuß

Quetschen verformt. Es ergibt sich eine Ausbreitung der Masse in radialer und tangentialer Richtung. Ein Abschneider entfernt die Masse, die über den Tellerrand hinausgequetscht wird (s. Bild 3.32).

3.2.4.3. Arbeitsprinzip beim Einformen

Die Rollerverformung nach dem Einformprinzip wird vorwiegend für die Herstellung von Bechern, Schalen (Untertassen) und rotationssymmetrischem Hohlgeschirr angewendet.
Der wesentliche Unterschied des Einformens zum Überformen besteht darin, daß das Rollerwerkzeug in die Form hineingeführt wird. Die Form liefert dabei die äußere Gestalt des Erzeugnisses und das Rollerwerkzeug die konkrete Wandstärke, also die Innenseite, des Erzeugnisses.
Sowohl im Überform- als auch im Einformverfahren lassen sich Schalen produzieren.
Während man bei der Herstellung großer Ge-

schirrartikel – insbesondere Flachgeschirr – auf die guten Eigenschaften des Gipses, s. Abschnitt 3.2.4.4., noch nicht verzichten kann, ist es möglich, Schalen und Becher im Einformverfahren mittels Kunststoff-Formen herzustellen. Kunststoff-Formen aus Polyurethan haben sich insbesondere wegen ihrer langen Lebensdauer in der Geschirrindustrie durchgesetzt.
Der Scherbenschnitt mit Rollerwerkzeug nach Bild 3.33 zeigt die prinzipielle Lösung für das Einformen von Schalen.

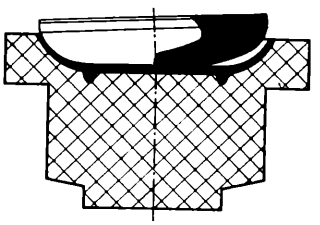


Bild 3.33. Scherbenschnitt und Rollerwerkzeug beim Einformen einer Schale

3.2.4.4. Physikalische Gesetzmäßigkeiten und keramische Probleme der Rollerformgebung

Aus keramischer Sicht wird der Ausformvorgang durch einige wesentliche Wirkprinzipien beeinflußt. Zu diesen gehören:

- die Differenzgeschwindigkeit zwischen Rollerwerkzeug und Spindel,
- die Annäherungsgeschwindigkeit von Rollerschablone und Form,
- die Rollerkopfbeheizung,
- das Vorquetschen des Masseblattes (Blattquetsche).

Bei der Rollerformgebung von Flachgeschirr besteht zwischen Form und Rollerschablone eine tangentiale Geschwindigkeitsdifferenz, die vom Mittelpunkt zum Rand zunimmt. Bild 3.34 zeigt das prinzipielle Geschwindigkeitsbild beim Rollersystem nach *Green* & Co. [145]. Bei gleicher Drehrichtung von Spindel und Rollerwerkzeug schneiden sich ihre Rotationsachsen im Mittelpunkt des Formlings (s. Bild 3.34a). Daraus resultieren die Umlaufgeschwindigkeit v_w für das Werkzeug und v_{sp} für die Spindel bzw. Form (s. Bild 3.34b).

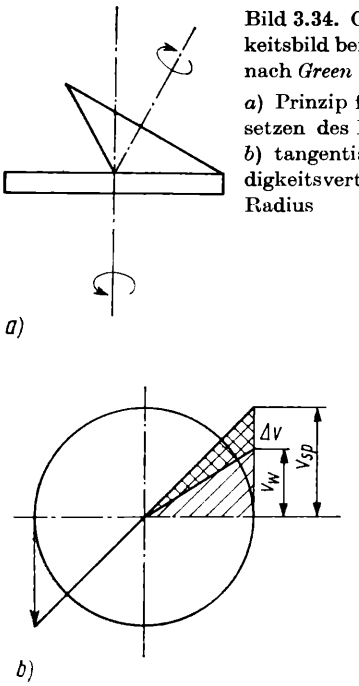


Bild 3.34. Geschwindigkeitsbild beim Rollersystem nach *Green* & Co. [145]
a) Prinzip für das Aufsetzen des Rollerkopfes
b) tangentiale Geschwindigkeitsverteilung über den Radius

Zur besseren Veranschaulichung sei der Verlauf der Tangentialgeschwindigkeiten an einem Beispiel näher erläutert. In Bild 3.35 ist das Scherbenprofil für das Ausformen eines Tellers »Coup 24 cm flach« mit der dazugehörigen Verteilung der Tangentialgeschwindigkeiten auf dem Profil der Tellerunterseite dargestellt [145].
Im Mittelpunkt des zu formenden Gegenstandes sind, wie aus der Darstellung hervorgeht, die Absolutbeträge der Tangentialgeschwindigkeiten und die Differenzgeschwindigkeit gleich Null. An den anderen Punkten der Tellerunterseite ist die Tangentialgeschwindigkeit des Werkzeuges kleiner als die der Spindel, wobei der Differenzbetrag mit zunehmendem Radius ansteigt. Dieses Prinzip führt dazu, daß die Masseteilchen auf der Tellerunterseite abgebremst werden. In der Praxis haben sich folgende Drehzahldifferenzen als günstig erwiesen:

Teller 24 cm Durchmesser
80 bis 100 min^{-1}
Teller 19 cm Durchmesser
130 bis 150 min^{-1}
Schale 11 bis 16 cm Durchmesser
150 bis 180 min^{-1}

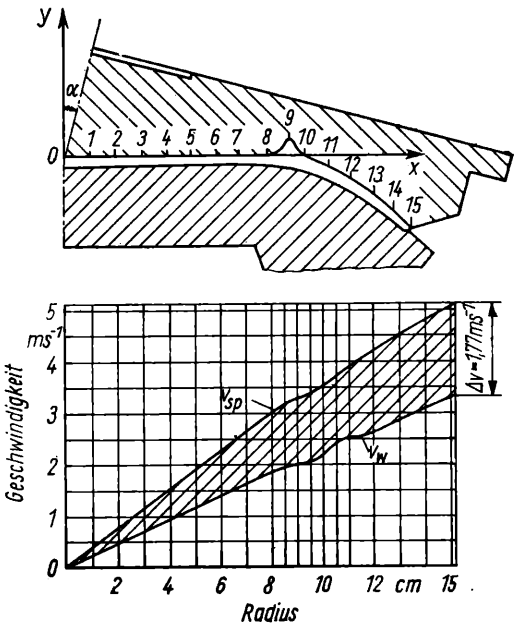


Bild 3.35. Verteilung der Tangentialgeschwindigkeiten auf dem Profil der Tellerunterseite [145]

v_w Tangentialgeschwindigkeit des Werkzeuges
v_{sp} Tangentialgeschwindigkeit der Spindel
(Durchmesser des Werkzeuges = 278 mm, Kippwinkel des Werkzeuges = 15°, Drehzahl des Werkzeuges = 230 min^{-1}, Durchmesser der Form = 272 mm, Drehzahl der Form = 360 min^{-1})

Becher (bei starrem Rollerkopf)
1 000 bis 1 200 min^{-1}.

Die aus den Eigenschaften der plastischen Masse resultierende Forderung, möglichst schnell, d. h. mit hoher Scherrate, zu verformen (s. Abschnitt 3.2.1.), kann beim Einformverfahren am besten realisiert werden. Dem Überformverfahren sind hier Grenzen gesetzt, da zu hohe Fliehkräfte ein Ablösen des Scherbens von der Form zur Folge hätten.

Die Tangentialgeschwindigkeiten sind aber nur die eine Seite. Für die Beurteilung der Fließvorgänge bei der Scherbenbildung müssen auch solche Faktoren, wie Druck, Radialkraft und Wärme, einbezogen werden. Druck und Radialkraft stehen in engem Zusammenhang mit der Annäherungsgeschwindigkeit von Rollerschablone und Form, die in der Regel empirisch ermittelt und durch hydraulische oder Kurvensteuerung realisiert wird.

Eine wesentliche Rolle spielt die Wärmeenergie, die durch die *Rollerkopfheizung* eingebracht wird. Die Aufgabe der Rollerkopfheizung ist es, über die Ausbildung eines Dampffilmes zwischen Rollerschablone und Masse das Ankleben der Masse am Rollerkopf zu verhindern und ihr Fließverhalten zu verbessern. Die Tendenz des Anklebens der Masse am Rollerkopf steht mit der Verformungsgeschwindigkeit in engem Zusammenhang. Während man beim Überformen von Flachgeschirr grundsätzlich auf die Rollerkopfheizung angewiesen ist, kann man bei einfachen Einformartikeln wegen der hohen Differenzgeschwindigkeit auf eine Beheizung verzichten. Nur bei Sonderartikeln, insbesondere bei tiefen Einformartikeln, ist eine Beheizung notwendig. Ebenfalls nicht beheizt werden Kunststoffrollerköpfe aus Perfol, wie sie z. B. für das Einformen von Schüsseln und Terrinen verwendet werden.

Der Einfluß der Temperatur auf die Ausformbedingungen und somit auf die Qualität des ausgeformten Erzeugnisses äußert sich in der Praxis in zwei Grenzfällen. Ist die Temperatur zu niedrig, so hat dies eine schlechte Oberflächenqualität oder das Ankleben des Erzeugnisses zur Folge. Eine zu hohe Temperatur dagegen führt zum sogenannten »Verbrennen« der Masse und damit ebenfalls zur Qualitätsminderung.

Das technologische Problem der Rollerkopfbeheizung besteht darin, für eine gegebene Masse die optimale Ausformtemperatur zu erzielen und diese während des technologischen Prozesses örtlich und zeitlich konstant zu halten. Zu diesem Zweck wird der in Bild 3.36 schematisch dargestellte Aufbau eines Rollerwerkzeuges realisiert [146]. Das eigentliche Heizelement besteht aus einem Gußkörper (*4*), in dem Heizwendeln mit Hilfe einer Einbettmasse zentrisch und gegenüber dem Gußkörper elektrisch isoliert eingelagert sind. Das Heizelement wird in einer Heizungsaufnahme (*5*) befestigt. Am Boden der Heizungsaufnahme ist der eigentliche Rollerkopf (*6*), Vollschablone, angeschraubt.

Eine ähnliche Wechselwirkung, wie zwischen Masse und beheiztem Rollerkopf, besteht zwischen Kunststoff-Form und Masse beim Einformen. Die Erwärmung der Kunststoff-Form auf etwa 80 °C stellt nicht, wie bei den Gipsfor-

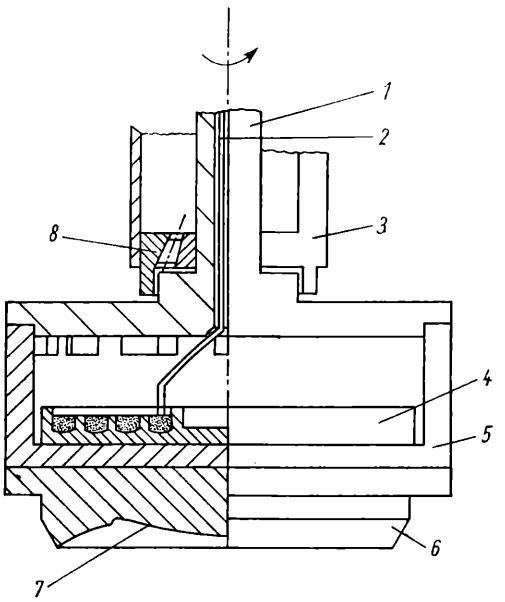


Bild 3.36. Schema eines Rollerwerkzeuges [146]
1 Welle, *2* Leitung, *3* Gehäuse, *4* Heizplatte, *5* Heizungsaufnahme, *6* Rollerkopf, *7* Formenkontur, *8* Lager

men, eine Formenrücktrocknung dar, sondern eine Vorwärmung zum Zwecke des besseren Ablösens des Scherbens von der Form.
Wie kompliziert und vielschichtig die Vorgänge bei der Rollerformung sind, wird außerdem offenbar, wenn solche Einflüsse in die Betrachtungen einbezogen werden, wie

- die Reibungsverhältnisse zwischen Form und Werkzeug bzw. Rollerkopf und Masseoberfläche,
- die Geschwindigkeitsgradienten innerhalb der Masse (gemessen über der Scherbendicke) und
- der durch die beheizte Werkzeugoberfläche bedingte Wasserentzug aus der Masse.

Die Untersuchungen über das Fließverhalten der Masse bei der Rollerverformung sind deshalb vorwiegend empirischer Art. Arbeiten von *Prochazka* und *Fosenbauer* [147] sowie *Entelis* und *Smirnova* [148] haben gezeigt, daß bei der Rollerverformung eine andere Texturierung des Scherbens entsteht als beim Drehen mittels Blechschablone. Die Textur, die die Schwindung maßgeblich beeinflußt, bewirkt, daß die mit dem Roller hergestellten Teller nach dem Glattbrand im Durchmesser kleiner, ansonsten aber stärker als die mit der Blechschablone geformten sind [148]. Die Schwindungsdifferenz zwischen der Dicke des Tellers und in radialer Richtung wurde von *Entelis* und *Smirnova* für die mit einem Rollerhalbautomaten PT 4 verformten Teller mit 0,31 % und für die mit der Blechschablone geformten Teller mit 1,54 % ermittelt. In beiden Fällen war die mittlere Schwindung in Richtung der Scherbendicke geringer als die mittlere Schwindung in radialer Richtung. Die Ursache ist in der Orientierung der Tonmineralteilchen parallel zum Rand in Drehrichtung der Spindel zu suchen.
Einen wesentlichen Einfluß auf die Texturgestaltung und damit auf die Qualität gerollter Erzeugnisse hat das *Blattquetschen*. Insbesondere bei Flachgeschirr größeren Durchmessers werden die Massestrang- (Hubel-) Abschnitte, bevor sie durch Rollen verformt werden, von einer Blattquetsche vorgeformt. Die Blattquetsche erfüllt daher zwei Aufgaben. Zum einen soll sie die von der Schneckenwelle der Strangpresse herrührenden asymmetrischen Makrotexturen abbauen helfen, und zum anderen soll sie der Massescheibe eine Vorzugsorientierung der Tonmineralien parallel zur Gipsformoberfläche vorgeben. Bild 3.37 zeigt schematisch die Ausrichtung der Tonmineralteilchen vor und nach dem Blattquetschen.

Bild 3.37. Ausrichtung der Tonmineralteilchen in der Massescheibe vor (*a*) und nach (*b*) dem Blattquetschen

Umfangreiche Untersuchungen über den Einfluß der Blattquetsche auf die Textur wurden von *Richter* und *Albrecht* [149] durchgeführt. Zur exakten Analyse der durch die Formgebung erzeugten Texturen wurden die ursprünglichen Hubelabschnitte einer Porzellanmasse in Scheiben geschnitten, durch Anilinfarbkörper unterschiedlich gefärbt, anschließend in bestimmter Schichtenfolge zusammengarniert und verformt. Mit den so erhaltenen Fließbildern konnten sie nachweisen, daß sich die Blattquetsche als unentbehrliches Aggregat zur Erzeugung eines ho-

rizontalen Materialflusses und einer vorwiegend symmetrisch homogenen Textur erweist.

Den Verlauf von Fließlinien bei der Rollerformgebung ermittelte auch *Brückner* [150]. Bei diesen Versuchen wurde Unterglasurstempelfarbe verwendet, die als dünner Film zwischen zwei Scheiben eines Masseblattes eingebracht wurde. Entgegen früheren Vorstellungen, die davon ausgingen, daß bei der Formgebung die mit der Gipsform in Berührung stehende Masse infolge Wasserentzugs nicht fließt und sich die nach außen gedrängte Masse überschlägt, wurde festgestellt, daß sich auf der Gipsform ein Schmierfilm ausbildet und die Masse auf diesem gleitet. Die mit der Blattquetsche erreichte Vorzugsorientierung der Masse kommt diesem Vorgang zugute. Außerdem konnte beobachtet werden, daß bei der Rollerformgebung auf die gesamte Fläche des Tellers – von der Mitte ausgehend – ein völlig gleichmäßiger Druck ausgeübt wird. Es besteht ein gleichmäßiger Massefluß, bei dem die oberen Schichten des Masseblattes bevorzugt nach außen gequetscht und als Abgang beseitigt werden. Die oberen Schichten des Masseblattes wirken dabei orientierend auf die unteren und tragen dazu bei, daß am Stauchrand der Form die Masse ausreichend verdichtet wird und der Scherben eine genügend hohe Kantenfestigkeit erhält.

Den Vorteilen der Rollerformgebung stehen die hohen Anforderungen bezüglich der Einhaltung bestimmter Verarbeitungsbedingungen gegenüber. Die Maschine kann sich nicht – wie der Mensch – unmittelbar an die veränderten Eigenschaften der Masse anpassen. Eine zu feuchte Masse wird bei konstanten Formgebungsparametern eine Zunahme der Texturbildung bewirken, da die Orientierung der Partikeln im Geschwindigkeitsgefälle sowie eine Sortierung der Teilchen erleichtert werden. Eine zu trockene Masse verschlechtert den Zusammenhalt der Teilchen und tendiert zur Rißbildung, da die Bindungskräfte zwischen den Teilchen nur wenig wirksam werden können.

Die Beeinflussung des Formgebungsprozesses und die damit verbundene Sicherung der Qualität zielen darauf ab, die Inhomogenität der Scherbentextur weitgehend zu unterdrücken. Inhomogenität des Scherbens ist nicht gleichbedeutend mit Inhomogenität der Masse. Sofern es sich um die Inhomogenität der Masse handelt, kann diese durch geeignete verfahrenstechnische Lösungen in der Aufbereitung beseitigt werden. Nicht beseitigen läßt sich die durch die Formgebung selbst verursachte Orientierung der Teilchen in Fließrichtung. Die daraus resultierende Anisotropie der Schwindung führt in jedem Fall zu Spannungen. Das Ausmaß der Verspannung ist dem Anteil an plastischen Rohstoffen proportional. Untersuchungen von *Vycudilik* und *Jedlička* [122] an Kaolin zeigten, daß mit Zunahme des unplastischen Anteils diese Erscheinung weitgehend zurückgeht. Der bildsamen Masse sind hier aber Grenzen gesetzt. Die Verringerung des plastischen Anteils führt zwangsläufig zur Verschlechterung der Verarbeitungseigenschaften; die Masse wird zu »kurz« und reißt. Aus der Einhaltung des plastischen Anteils und dem damit verbundenen Vorhandensein von plättchenförmigen Partikeln resultieren die Unvermeidlichkeit des Entstehens einer orientierten Textur und das damit verbundene Auftreten von Spannungen. Alle Bemühungen, die darauf abzielen, die Qualität der gerollten Erzeugnisse um ein Vielfaches zu verbessern, sind deshalb nicht real [122].

3.2.4.5. Fehler bei der Rollerformgebung

Anders verhält es sich bei Fehlern, die aus der Maschineneinstellung resultieren und sich prinzipiell beseitigen lassen. Änderungen der technologischen Parameter, wie Differenzgeschwindigkeit, Rollerkopftemperatur, Laufeigenschaften der Form usw., rufen andere Texturen und Spannungsverteilungen hervor, die schwerwiegende Folgen haben können. Durch die aus falscher Maschineneinstellung und unzulänglichen Formeneigenschaften resultierenden Fehler wird die Produktivität des Verfahrens erheblich beeinflußt.

Die bei *Flachgeschirr* am häufigsten auftretenden Fehler sind auf die im vorherigen Abschnitt genannte Inhomogenität der Scherbentextur zurückzuführen und lassen sich durch geeignete Wahl der Drehzahlen von Spindel und Rollerkopf sowie der Differenzgeschwindigkeit einschränken. Bei *durchgehenden Böden* ist es sinnvoll, mit höherer, bei *krummen Fahnen* mit niedrigerer Differenzgeschwindigkeit zu arbeiten. Das Auflegen des Masseblattes außerhalb der

Formenmitte führt auch zu krummen Tellerfahnen.
Bei *Sternbildung auf dem Tellerboden* sind alle Maschinenteile und deren Befestigung, die die Laufeigenschaften von Rollerkopf und Ausformspindeln beeinflussen, sowie die Paßgenauigkeit der Formen auf den Spindelaufnahmen zu überprüfen.
Zeigen sich *Schleifen auf dem Tellerboden*, so ist das auf einen zu großen Absenkhub der Spindel während einer Überformung (hierbei wird unter »Überformung« eine Umdrehung der Spindel im Massekontakt verstanden) zurückzuführen. Sie können entweder durch Verringerung der Absenkgeschwindigkeit der Spindel oder durch Erhöhung der Anzahl der Überformungen je Zeiteinheit bei konstanter Absenkgeschwindigkeit beseitigt werden.
Sind auf der frisch geformten Tellerunterseite *Hitzewellen*, d. h. zu stark getrocknete Masse, zu erkennen, wird dem Rollerkopf eine zu hohe Heizleistung zugeführt. Das kann auch zu *Fußrissen* führen.
Wird der *Fuß nicht fertig ausgeformt*, so ist die Masse zu hart. In Grenzfällen kann durch Erhöhung der Rollerkopftemperatur eine Verbesserung erzielt werden.
Ein falsch eingestellter oder verschlissener Abschneider führt zu *Fahnenrissen*. Sonstige *Risse* treten neben den in Abschnitt 3.2.4.4. genannten Ursachen mehr oder weniger stark bei Lufteinschlüssen in der Masse und auch bei Einsatz neuer Gipsformen in Abhängigkeit von deren Eigenschaften auf.
Sprossige Tellerinnenflächen sind auf einen zu geringen Reibungskoeffizienten zwischen Gipsform und Masse zurückzuführen und treten bei Gipsformen ungenügender Qualität und in Grenzfällen bei zu geringem Spindelvakuum auf.
Formenbruch ist

- auf die Zerstörung des Gipses durch zu hohe Trocknungstemperaturen und
- auf die ungenügende Paßgenauigkeit der Formen auf der Spindelaufnahme

zurückzuführen. Bei verketteten Maschinenstraßen muß man deshalb besonders an den Übergabestellen auf eine entsprechend exakte und auf die Festigkeitswerte der Gipsform abgestimmte Einstellung der Bewegungsabläufe achten.

Bei *Hohlgeschirr* treten, obwohl beim Einformen der Formgebungsprozeß weniger problematisch als beim Überformen ist, ebenfalls maschinen- und technologiebedingte Inhomogenitäten im Scherben auf. Durch das senkrechte und zentrische Einsetzen der Hubelstücken auf den Formenboden wird der Anteil der *unrunden Becher* eingeschränkt. Eine der Formlingsgeometrie entsprechende Wahl der Geometrie der Hubelstücken und des Durchmessers des Rollerwerkzeugs tragen ebenfalls zu einer guten Homogenisierung bei.
Durch die Einstellung der geeigneten Bewegungsabläufe für den Vertikal- und Horizontalhub, s. auch Abschnitt 4.2.2.2., und die Verwendung »härterer« Massen kann der *Schleifenbildung* entgegengewirkt werden.
Bei *Lufteinschlüssen* zwischen Formling und Form sind das Spindelvakuum und bei dichten Kunststoff-Formen die Entlüftungsbohrungen zu überprüfen. In Grenzfällen kann auch durch die Erhöhung der Rollerkopftemperatur eine Verbesserung erreicht werden.
Bei *unsymmetrischem Scherben* sind die Paßgenauigkeit der Form in der Aufnahme und der Lauf der Ausformspindel zu überprüfen.

3.2.4.6. Vollendungsarbeiten

Zu den wichtigsten Vollendungsarbeiten innerhalb des Formgebungsprozesses gehört das Garnieren. Unter Garnieren versteht man das Zusammensetzen von Einzelteilen oder das Anbringen von Einzelteilen an einen Grundkörper (s. auch Abschnitt 3.1.3.).
Obwohl das Garnieren an kein bestimmtes Formgebungsverfahren gebunden ist, soll es wegen seiner großen Anwendungsbreite in der Geschirrkeramik in Verbindung mit der Rollerformgebung näher erläutert werden. Der sicher häufigste Anwendungsfall ist das Angarnieren von Henkeln an Becher. Bei diesem Arbeitsgang wird ein durch Gießen hergestellter Henkel an einen durch Rollerformgebung hergestellten Becher mit Hilfe eines Garnierschlickers angesetzt. Der Garnierschlicker soll nach Möglichkeit die gleiche Zusammensetzung wie die zu garnierenden Teile haben. Man stellt ihn deshalb vorwiegend aus Weißbruch (getrockneten Massescherben) unter Zugabe von Wasser und einem

organischen Klebemittel, z. B. Zellin, her. Auch Zusätze von Betriebsglasur oder eines weißbrennenden Tones sind gebräuchlich.
Das Garnieren erfolgt im lederharten Zustand der Einzelteile. Die Feuchtigkeit der Garnierteile soll möglichst gleich sein, damit zusätzliche Spannungen durch unterschiedliche Trockenschwindung vermieden werden. In Ausnahmefällen ist auch noch das Garnieren weißgetrockneter Artikel anzutreffen.
Beim Garnieren eines Henkels an einen Becher werden die Abschnittflächen des Henkels in den Garnierschlicker getaucht und sofort an den Becher gedrückt. Wichtig ist hierbei, daß die Abschnittflächen präzise geschnitten sind und mit der gesamten Fläche am Becher anliegen. Nach dem Andrücken des Henkels an den Becher muß die Nahtstelle gut verstrichen und verschwammt werden.
Das Garnieren wurde bisher von Hand durchgeführt und war deshalb sehr arbeitskräfteintensiv. Auch die Einführung von Garniermaschinen hat daran nichts Wesentliches ändern können, da das Einlegen der Garnierteile und auch das Verstreichen der garnierten Artikel in der Regel weiterhin von Hand vorgenommen werden muß.
Mit der Neuentwicklung automatischer Tassenfertigungsanlagen wird eine Lösung vorgestellt, die den Garnierprozeß durch Einsatz mechanischer Schwingungen unter Zuhilfenahme von Wasser automatisiert.
Weitere wichtige Folgearbeiten sind das Putzen und Verschwammen. Ebenso wie das Garnieren sind diese Arbeitsgänge an die verschiedensten Primärtechnologien gebunden. Putz- und Verschwammanlagen sind für die Herstellung von Hochspannungsisolatoren ebenso erforderlich wie für die Geschirrproduktion durch Gießen oder Rollen. Als integrierter Bestandteil einer Formgebungsmaschine oder als separate Einheit einer vollverketteten Fließlinie gibt es die verschiedensten Putz- und Verschwammeinrichtungen. Als Beispiel sei hier die Einrichtung für die Becherlinie Be 2-L, s. Abschnitt 4.2.2.2., genannt.

3.2.5. Weitere Formgebungsverfahren für bildsame Massen

3.2.5.1. Arbeitsweise von Streichmaschinen

Streichverfahren sind in der Ziegel- und Feuerfestindustrie gebräuchlich.
Im Handstreichverfahren können weichplastische Massen mit einem Wassergehalt von 20 bis 27 % verarbeitet werden. Durch Eindrücken der Masse in Formen und Abstreichen der Oberseite werden Erzeugnisse mit einfacher geometrischer Form hergestellt. Vor der Einführung der Schneckenpressen wurden Ziegel ausschließlich nach diesem Verfahren hergestellt. Heute wird das Handstreichverfahren nur noch zur Herstellung größerer Schamotte-Formsteine in geringen Stückzahlen angewendet.
Eine größere Bedeutung hat das Handstreichverfahren bei der Verarbeitung krümeliger feuerfester Massen. In Verbindung mit handgeführten Vibratoren oder Stampfern werden Feuerbetone, Schamotte- und Silikamassen verdichtet und die Oberflächen von Hand abgestrichen (s. auch Abschnitt 3.4.2.2.).
Von den Maschinen, die nach dem Streichverfahren arbeiten, besitzen die Streichmaschinen für die Herstellung von Ziegeln eine technische Bedeutung. Streichmaschinen werden für die Verarbeitung magerer, schluffiger Tone eingesetzt. Zu diesen gehören insbesondere die pleistozänen Bändertone, die im Winter einen relativ hohen Wassergehalt aufweisen. Bei einer Verarbeitung auf Schneckenpressen bereiten diese Tone Schwierigkeiten, weil sie die Deformation der Erzeugnisse begünstigen [132]. In Holland ist das Streichverfahren das dominierende Verfahren für die Herstellung von Ziegeln.
Das Prinzip der Volumenfüllung bei Streichmaschinen hat eine Ähnlichkeit mit dem der Drehtischpressen. Der Ausstoß der Erzeugnisse erfolgt vertikal. Ein horizontaler Ausstoß wird möglich, wenn die Form als Kippform ausgebildet ist.
Die Leistung moderner Streichmaschinen übertrifft mit 18000 bis 20000 Normalformatziegeln je Stunde die Leistung von Schneckenpressen. Nachteilig sind aber die schlechte Maßhaltigkeit der Erzeugnisse und die unregelmäßige Kanten-

ausbildung, die den Einsatz von Setzmaschinen erschweren und recht instabile Rohlingsstapel auf den Tunnelofenwagen zur Folge haben. Die hohe Massefeuchtigkeit und der geringe Druck beim Maschinenstreichverfahren bewirken weiterhin eine geringere Verdichtung der Masse als beim Strangpressen. Durch Streichverfahren hergestellte Ziegel haben in der Regel eine höhere Porosität und eine geringere Festigkeit.
Die wesentlichsten Fehler, die bei diesem Verfahren auftreten, sind die Ausbildung von Lunkern durch Lufteinschlüsse, insbesondere bei zu weicher Masse, und Texturen in Form von Lagen- und Schichtenbildungen bei zu steifer Konsistenz.

3.2.5.2. Verarbeitung von Plastiks

Plastiks sind steifplastische feuerfeste Massen, die auf Strangpressen gezogen werden und als Batzen von 24 cm × 18 cm × 35 cm im Industrieofen- und Dampferzeugerbau, insbesondere auch für Reparaturzwecke, zur Verarbeitung gelangen. Da es sich eindeutig um die Verarbeitung plastischer Massen handelt, werden sie Abschnitt 3.2. und nicht Abschnitt 3.4.2., Verfahren zur Verarbeitung feuerfester Gemenge, zugeordnet. Wegen der besseren Handhabung sind sie in der Regel in drei Scheiben von 6 cm Dicke geschnitten und in Plastfolie eingeschlagen. Plastiks können anstelle von Formsteinen eingesetzt werden und ermöglichen ein fugenloses bzw. fugenarmes Mauerwerk. Da sie ungebrannte Erzeugnisse sind, erhalten Plastiks ihre keramische Bindung erst nach dem Aufheizen des Mauerwerkes.
Die Verarbeitung erfolgt in der Weise, daß die plastischen Batzen scheibenweise mit einem etwa 2,5 kg schweren Stahlhammer oder mit einem Preßluftstampfer festgeschlagen werden. Bevor eine weitere Massescheibe aufgelegt wird, muß die bereits festgeschlagene gut aufgerauht werden. Die Stampflagen befinden sich generell senkrecht zur Angriffsseite (Feuerraum). Für senkrechte Wände ergibt sich somit eine horizontale, bei Hängedecken eine senkrechte Stampflage, und bei zylindrischen Auskleidungen zeigen die Stampflagen zur Zylinderachse [151]. Werden die Scheiben flach zur Angriffsseite gestampft, besteht die Gefahr des Abplatzens.
Vor dem Einbringen der Plastiks ist darauf zu achten, daß der Reparaturstelle keine Asche- oder Schlackereste anhaften. Erst, wenn diese entfernt sind, wird der Untergrund angefeuchtet und die Masse angeschlagen. Da die Masse beim Trocknen schwindet, ist es erforderlich, Schwindungsfugen im Raster von 400 bis 500 mm, etwa 1 mm stark und 30 bis 50 mm tief, je nach Wanddicke, einzuschlagen.
Um eine reibungslose Trocknung zu gewährleisten, stößt man außerdem mit einem 3 bis 4 mm starken Stift schräg von unten nach oben in einem Raster von 150 mm durchgehende Löcher in die Zustellung. Des weiteren darf auf keinen Fall die Oberfläche der Plastiks glattgestrichen werden. Diese Maßnahme würde die Poren verschmieren und die Trocknung behindern. Ein Glattstreichen kommt nur für solche Ofenbezirke in Betracht, die direkt mit der Schmelze in Berührung stehen. In diesem Falle wird auch auf das Einbringen von Luftlöchern verzichtet.
Beim Zusetzen senkrechter Wände oder nach innen geneigter Flächen werden zusätzlich Halterungen angebracht, die im einfachsten Falle aus 6 bis 8 mm Rundeisen bestehen und in die Wand hinter den Plastiks eingelassen sind.

3.2.5.3. Granulieren und Brikettieren

Unter *Granulieren* oder Pelletieren versteht man die Gewinnung eines Granulats durch Zerkleinerung größerer oder durch Zusammenfügen kleinerer, vorwiegend plastischer Stoffteilchen. Als *Brikettieren* bezeichnet man einen Vorgang, bei dem definierte Körper mit Abmessungen über 20 mm entstehen [152]. Obwohl das Granulieren und das Brikettieren in erster Linie Verfahrensabschnitte der Aufbereitung sind, z. B. die Herstellung von Sprühgranulat oder die Zerkleinerung von Rohstoffen in Granulatoren, gibt es Anwendungsfälle, wo diese Stufen der Aufbereitung durch keinen weiteren Formgebungsprozeß ergänzt werden. Die Herstellung von *Granulat* als Endprodukt hat eine Bedeutung u. a. für die Erzeugung von Leichtzuschlagstoffen und für die Gewinnung von Spezialschamotte.
Als Formgebungsverfahren kommen für diese Erzeugnisse zwei prinzipielle Möglichkeiten in Betracht, das Aufbaugranulieren und das Preßgranulieren.

Das *Aufbaugranulieren* erfolgt mit Hilfe eines schräg gelagerten rotierenden Granuliertellers oder einer Granuliertrommel, und zwar in der Weise, daß eine pulverförmige, Ton oder Kaolin enthaltende Masse in dünnem Strom aufgegeben und gleichzeitig tropfenweise mit Wasser versetzt wird. Bedingt durch die rollende Bewegung bilden sich Kugeln, das Granulat.

Beim *Preßgranulieren* wird in der Regel eine plastische Masse durch ein Mundstück oder eine Schlitzplatte gepreßt und das Granulat durch Abbrechen oder Abschneiden gewonnen.

Im Anschluß an die Formgebung werden die Granalien bzw. die Tonnudeln in Drehrohröfen oder Schachtöfen gebrannt. Bei der Herstellung von Leichtzuschlagstoffen nutzt man zusätzlich das aus dem Ton entweichende Gas zum Aufblähen der Erzeugnisse aus. Nach diesem Verfahren entstehen die unter dem Namen Agglopori t und Blähton bekannt gewordenen Leichtzuschlagstoffe für die Betonindustrie.

Insbesondere für die Herstellung von Spezialschamotte verwendet man das *Brikettieren*. Dieses Verfahren, aus der Kohle- und Koksbrikettierung übernommen, wird vornehmlich mit Walzenpressen realisiert (s. Abschnitt 3.2.3.1.). Die plastische Masse wird bei dieser Technologie zwischen zwei rotierenden Walzen eingezogen und durch Vertiefungen in der Zylinderoberfläche oder durch Öffnungen im Zylindermantel hindurchgepreßt.

3.2.5.4. Nachpressen

Massenartikel mit komplizierter geometrischer Form werden oftmals als Massebatzen oder Masseblätter vorgeformt und erhalten durch anschließendes Nachpressen oder Stanzen ihre endgültige Form. Zur Durchführung dieses Verfahrens können unterschiedliche Pressen zum Einsatz kommen. Zum Teil sind es Maschinen, die sonst z. B. zum Trockenpressen – also für die direkte Formgebung – verwendet werden, zum Teil aber auch Pressen spezieller Bauart. Aufgrund der weitaus größeren industriellen Bedeutung des Trockenpressens sollen in diesem Kapitel nur die Preßverfahren behandelt werden, die in erster Linie für das Nachpressen und weniger für die direkte, einstufige Formgebung typisch sind. Die Darstellung der Trockenpreßtechnologien erfolgt in Abschnitt 3.3.

Nachpreßverfahren sind vor allem in der bau- und grobkeramischen Industrie anzutreffen. Bildsame, leicht verformbare Massen werden bei einem relativ niedrigen Druck zu Doppelfalzdachziegeln, speziellen Ofenkacheln und anderen Erzeugnissen nachgepreßt. Aber auch einen großen Teil der in der Feuerfestindustrie hergestellten Stahlwerksverschleißmaterialien, z. B. Kanalsteine, formt man durch Nachpressen.

Das einfachste Formgebungsprinzip besitzen die *Schlaghebelpressen*. Über einen Exzenter wird die Bodenplatte der Form, auf der sich das aufgelegte Massestück befindet, durch Umwerfen eines Schlaghebels in die Form abgesenkt. Gleichzeitig senkt sich der an einer Traverse befestigte Oberstempel, der die Masse in die feststehende Form drückt. Nach erfolgter Formgebung geht der Oberstempel durch Zurückschlagen des Schlaghebels in seine Ausgangslage zurück, und das geformte Erzeugnis wird durch Heben der Bodenplatte ausgeworfen. Da diese einfachen Nachpressen im Normalfall keine Spritzlöcher für das Abgeben überschüssiger Masse besitzen, ist es wichtig, daß die Menge des aufgelegten Strangstückes oder Batzens bereits der des herzustellenden Erzeugnisses entspricht.

Eine höhere Produktivität besitzen die halbautomatisch arbeitenden *Exzenter- oder Kurvenpressen* (s. Abschnitt 4.2.3.1.). Um die Reibung in der Form und ein Ankleben der Masse an der Form zu unterbinden, werden die Massebatzen, bevor sie verpreßt werden, mit Öl bestrichen. Der Ölauftrag erfolgt mit Hilfe einer Ölzerstäubungsanlage oder mit Walzen als gleichmäßiger Ölfilm. Exzenterpressen besitzen Spritzlöcher, aus denen während des Preßvorganges überschüssige Masse und Luft entweichen können. Die Zuteilung der Masse und das Austragen der Preßlinge erfolgen durch Schwenkarme und Mitnehmer. Bei mechanisierter Abnahme der Formlinge vom Preßtisch können mit Exzenterpressen etwa 15000 Normalformatsteine in einer Schicht produziert werden [153]. Das Produktionssortiment reicht von der Voll- und Hohlware bis zu schweren, komplizierten Formsteinen.

Ebenfalls mit Exzenterwirkung arbeiten die *Revolverpressen* (s. Bild 4.44). Das Hauptanwendungsgebiet dieser Presse betrifft die Herstellung von Dachfalzziegeln.

Zur Herstellung von Ofenkacheln, Ecken und Simsen dienen *Kachelpressen*. Kachelpressen sind meist als Zwillingspressen ausgelegt und besitzen demzufolge zwei Unterstempel und zwei Oberstempel. Die Formen sind Blechkästen oder Metallformen, die mit Gips ausgegossen sind. Das Ausformen erfolgt, indem die Massescheibe in die Unterform gelegt und diese mit Hilfe eines Exzenters gegen die Oberform gefahren wird.

Weiterhin gibt es verschiedene Spezialpressen, zu denen die nach dem Kniehebelprinzip (s. auch Bild 4.48) arbeitenden *Stanzen*, die horizontal arbeitenden automatischen *Kanalsteinpressen*, spezielle *Rohrpressen* mit vertikaler Preßrichtung und andere gehören. Eine Formgebungsmaschine, die Pressen und Drehen vereinigt, ist die *Blumentopfpresse*. Bei dieser Presse wird die mit Masse gefüllte Unterform gegen einen rotierenden Oberstempel gefahren. In der Feuerfestindustrie werden zum Nachpressen auch *Friktionsspindelpressen* eingesetzt, die ihre Hauptanwendung jedoch bei der Formgebung unplastischer Massen, s. Abschnitt 4.3.2., finden.

3.2.5.5. Naßpressen

Nach dem Naßpreßverfahren, das aufgrund der guten Fließfähigkeit der Masse und ihrer geringen Möglichkeit, Druck aufzunehmen, ebenfalls der bildsamen Formgebung zugeordnet wird, werden Erzeugnisse der technischen Keramik und zum Teil auch Feuerfestkeramik hergestellt, deren geometrische Form meist kompliziert ist und die durch andere, produktivere Verfahren, z. B. durch Trockenpressen, nicht hergestellt werden können. Das betrifft insbesondere Erzeugnisse mit sogenannten Unterschneidungen, z. B. Gewinde oder Nuten senkrecht zur Preßrichtung. Der Anteil der nach diesem Verfahren hergestellten Artikel ist relativ gering und wird durch die zunehmende Anwendung des isostatischen Pressens (s. Abschnitt 3.3.5.) weiter zurückgedrängt. Im folgenden soll deshalb nur auf das Prinzip des Naßpressens hingewiesen werden. Nähere grundsätzliche Ausführungen zum Pressen beinhaltet Abschnitt 3.3.

Das Arbeitsprinzip des Naßpressens zeigt Bild 3.38 [2]. Danach wird die Form zunächst mit einer krümeligen, feuchtplastischen Masse mit einem Wassergehalt zwischen 8 und 16 % gefüllt. Die Dosierung erfolgt im Überschuß, so daß Masse auf dem Preßwerkzeug liegenbleibt. Beim Herunterfahren des Stempels wird die Masse zusammengepreßt. Aufgrund der bildsamen Eigenschaften kann die Masse nur in begrenztem Umfang Druckspannungen aufnehmen (sie ist ab einem bestimmten Verdichtungsgrad inkompressibel wie eine Flüssigkeit), so daß die überschüssige Masse durch den Spalt zwischen Stempel und Form entweicht. Der aufzuwendende Preßdruck wird durch die Feuchtigkeit der Masse bestimmt. Nach abgeschlossenem Preßvorgang wird der Formling aus der Form ausgestoßen und kann abgenommen werden. Der Preßdruck liegt meist unter 1 MPa.

3.2.5.6. RAM-Pressen

Durch die Entwicklungsarbeiten von *Blackburn* [154] wurde in den 50er Jahren ein Verfahren bekannt, das die Herstellung unregelmäßiger Artikel ohne Unterschneidungen sowie das unmittelbare Versehen dieser Teile mit Henkeln, Griffen und Durchbrüchen in einem Arbeitsgang

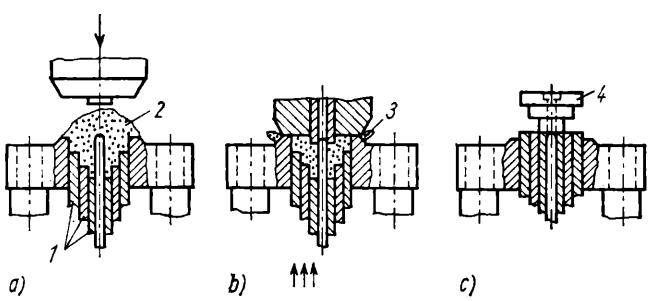


Bild 3.38. Arbeitsprinzip des Naßpressens [2]
a) in Füllstellung
b) in Preßstellung
c) in Ausstoßstellung
1 Ausstoßer, *2* Masse im Überschuß, *3* abgequetschte Masse, *4* fertiger Preßling

gestattet. Dieses nach amerikanischen Firmennamen bezeichnete RAM-Verfahren ist eine spezielle Form des Naßpressens.
Das RAM-Pressen verwendet zum Formen keramischer Erzeugnisse harte und durchlässige Stempel aus Spezialgips, die mit Baumwollschläuchen durchzogen sind. Die porösen Stempel sind in ein Metallgehäuse mit Einstellzapfen eingelassen und in einer hydraulischen Presse angeordnet. Die Lebensdauer der anfangs verwendeten Gips/Zement-Formen lag bei 1000 bis 1200 Abformungen. Inzwischen werden von einigen Spezialgipsherstellern Formbaustoffe angeboten, die bis zu 7000 Abformungen ermöglichen [155]. Im Durchschnitt kann man mit 3000 bis 3500 Abformungen rechnen.
Die Herstellung des Erzeugnisses läuft in folgender Weise ab: Zu Beginn des Preßvorganges wird von einer Bedienungsperson ein Massebatzen in die geöffnete Form eingelegt und die Presse eingeschaltet. Die Formgebung erfolgt dann durch Absenken des Oberstempels mit der Oberform. Während der kurzen Druckverweilzeit wird am Ober- und Unterstempel ein geringer Unterdruck wirksam, der den Auspreßvorgang beschleunigt. Der Formling wird dadurch besser entwässert und verdichtet, so daß ein angesteifter manipulierbarer Formling entsteht.
Das Ablösen der Rohlinge von der Form erfolgt mittels Druckluftstoß durch die Baumwollschläuche. Zunächst wird der Unterstempel mit Druckluft beaufschlagt. Der Formling löst sich dadurch an seiner Unterseite von der Form, und die beiden Stempel werden auseinandergefahren. Vom Oberstempel wird er so lange festgehalten, bis er zum Zwecke des Umsetzens auf eine Transporteinrichtung durch einen Druckluftstoß freigegeben wird [156].
Die Leistung des RAM-Pressens ist zur Zeit mit 3 bis 4 Stück/min relativ gering. Das Verfahren stellt deshalb keinen Ersatz für das hochproduktive Trockenpressen oder Rollen dar. Für die Herstellung komplizierter, ungleichmäßiger und dickwandiger Artikel jedoch, die bisher durch Gießen hergestellt wurden, bringt dieses Verfahren eine Verbesserung der Produktivität. Mit relativ geringem Kostenaufwand können Hotel- und Haushaltgeschirrteile sowie Sanitär- und Baukeramik produziert werden. Besonders vorteilhaft erweist sich das RAM-Verfahren für kleinere Betriebe, die ein breites Produktionsprogramm mit teilweise geringen Stückzahlen und verschiedenen Formgebungstechniken bewältigen müssen.
Bezüglich der Verarbeitungsgrenzen keramischer Massen wird eingeschätzt, daß sich alle Massen eignen, die unter Druck fließen, auch solche mit hohen Anteilen unplastischer Bestandteile, wie z. B. Feuerfestmassen. Je nach Plastizität beträgt der erforderliche Auspreßdruck 4,0 bis 4,5 MPa bei Steinzeug- und Steingutmassen. Für stark schamottierte Steinzeug- und Feuerfestmassen wird bei einer Feuchte von 16 bis 18 % ein Auspreßdruck von 4,5 bis 5,2 MPa benötigt.

3.3. Formgebung unplastischer Massen durch Pressen

3.3.1. Vorbemerkungen

Unter Pressen versteht man ein Formgebungsverfahren, bei dem eine rieselfähige, krümelige Masse unter Druck verdichtet wird. Beträgt der Feuchtigkeitsgehalt bei tonigen Massen 4 bis 8 %, so spricht man vom Trockenpressen (vgl. Abschnitt 3.2.5.5., Naßpressen).
Das Trockenpreßverfahren entwickelte sich, bedingt durch die günstige Form der Artikel, zunächst für die Produktion von Wand- und Bodenplatten. Bereits um die Jahrhundertwende wurde dieses Verfahren aber auch für die Formgebung von Steatitmassen angewendet. Die gute Gleitfähigkeit des Specksteins oder Talkums erleichterte die Anwendung des Verfahrens.
Obgleich das Trockenpreßverfahren größere Anforderungen an die Maschinen und Werkzeuge als z. B. das Naßpressen stellt und auch der Einbau einer Entstaubungseinrichtung fast immer unumgänglich ist, bietet es wesentliche Vorteile gegenüber anderen Verfahren. Diese bestehen vor allem

- in der guten Maßhaltigkeit der Erzeugnisse,
- in der guten Automatisierbarkeit,
- im Wegfall der platz- und zeitraubenden keramischen Trocknung und
- in der hohen Produktivität.

Grenzen sind der Anwendung des Trockenpressens durch die Form der Erzeugnisse gesetzt. Wenn man von speziellen Anwendungsfällen,

z. B. des isostatischen Pressens, einmal absieht, können durch Trockenpressen nur relativ einfache – in der Regel prismatische – Körper hergestellt werden.

Da das Trockenpressen im Vergleich zu anderen keramischen Verfahren keine oder nur geringe Ansprüche an die Bildsamkeit der Masse stellt, wird es insbesondere für die Formgebung von Massen mit geringen oder gar keinen Anteilen an bildsamen Rohstoffen, d. h. von elektrokeramischen, feuerfesten und hochfeuerfesten Massen, aber auch zur Herstellung von Fliesen eingesetzt. In der baukeramischen Industrie, in der technischen Keramik und in der Feuerfestindustrie ist dieses Verfahren weit verbreitet.

Neben dem Trockenpressen haben für die Formgebung unplastischer Massen spezielle Preßverfahren, wie das isostatische Pressen und das Pressen bei hohen Temperaturen, eine ständig zunehmende technische Bedeutung erlangt. Letztere Verfahren kommen insbesondere für Konstruktionskeramik zur Anwendung.

3.3.2. Gesetzmäßigkeiten des Trockenpressens

3.3.2.1. Preßvorgang

Das Trockenpressen unterscheidet sich vom Naßpressen (s. Abschnitt 3.2.5.5.) nicht nur durch einen geringeren Feuchtigkeitsgehalt der Masse, sondern auch im Ablauf des Preßvorganges. Während beim Naßpressen die Masse im Überschuß dosiert werden kann, besteht beim Trokkenpressen, wie Bild 3.39 zeigt, diese Möglichkeit nicht. Infolge ihrer großen inneren Reibung zwischen Formenwand und Preßstempel kann die Trockenpreßmasse nicht entweichen. Für die Durchführung des Trockenpressens ist deshalb eine genaue Massedosierung unerläßlich. Diese kann entsprechend der Masse oder volumenmäßig erfolgen. Bei der *volumenmäßigen* Dosierung wird der Hohlraum der Preßform vollständig mit Masse gefüllt, die danach glatt abgestrichen wird. Diese Methode kommt vorwiegend bei der Herstellung von Wand- und Bodenfliesen zur Anwendung. Dort, wo neben konstanten Abmessungen auch die genaue Einhaltung der Höhe und die Gewährleistung einer konstanten Rohdichte wichtig sind, z. B. bei verschiedenen Feuerfesterzeugnissen und Artikeln der technischen Keramik, erfolgt die Dosierung nach der *Masse*.

Den eigentlichen Preßvorgang kann man nach [157] in drei Preßdruckbereiche einteilen, die beim Pressen durchlaufen werden, Bild 3.40:

- Der Bereich *I* der Verdichtung ist gekennzeichnet durch die Verschiebung der Teilchen in Preßrichtung. Dabei müssen die am Stempel anliegenden Teilchen den größten Weg zu-

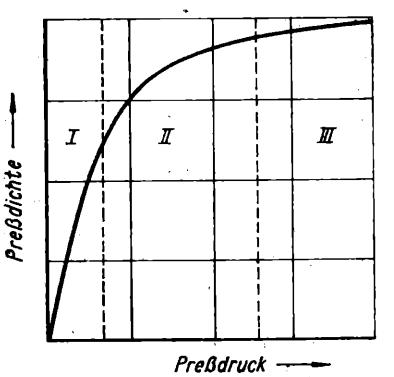


Bild 3.40. Preßdichte in Abhängigkeit vom Preßdruck [11]

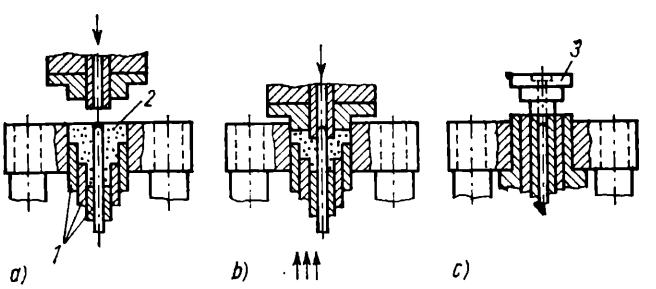


Bild 3.39. Arbeitsprinzip des Trockenpressens [2]
a) in Füllstellung
b) in Preßstellung
c) in Ausstoßstellung
1 Ausstoßer, *2* Masse abgestrichen, *3* fertiger Preßling

rücklegen. Die Verdichtung erfolgt im wesentlichen durch reine Gleit- und Orientierungsvorgänge.

- Im Bereich *II* der Verdichtung kommt es zur plastischen Verformung von Feststoffteilchen und zur Zerkleinerung von Partikelagglomeraten. Die Druck/Verdichtungs-Funktion erhält einen ausgeprägt degressiven Verlauf. Es entstehen dichtere Teilchenpackungen, die eine weitere Hohlraumausfüllung erschweren. Wegen der bereits einsetzenden Partikelzerstörung nimmt die Verdichtung mit steigendem Druck nur noch geringfügig zu. Im Preßdruckbereich *II* wird für viele Erzeugnisse der Feuerfest- und der Baukeramik bereits der erforderliche Enddruck erreicht.
- Im Bereich *III* sind nur noch geringe Teilchenbewegungen möglich. Bei Drücken von >100 MPa kommt es zur weiteren Zerstörung von Partikeln und gegebenenfalls zum plastischen Kristallfließen. Es ergibt sich nur noch ein geringer, fast linearer Anstieg der Preßdichte, die einen Maximalwert nahe der theoretischen Dichte anstrebt.

Obwohl die Verdichtung einer Preßmasse, wie hinreichend bekannt und in Bild 3.40 gezeigt ist, exponentiell vom Preßdruck abhängt, ist eine exakte mathematische Beschreibung dieses Vorganges dennoch extrem schwierig [158]. Man beschränkt sich deshalb darauf, die Verdichtung in den genannten drei Etappen einzeln zu beschreiben [157, 159]. Da diese Überlegungen im wesentlichen von theoretischem Interesse sind, soll hier nicht näher darauf eingegangen werden.

In der Praxis stehen im Vordergrund

- die Erzeugung eines homogenen Erzeugnisses, insbesondere die Vermeidung von Preßtexturen,
- der Druckdurchgang durch die Masse beim Pressen und
- die aufzuwendende Arbeit.

Das Pressen eines homogenen Erzeugnisses mit konstanter Rohdichte setzt – wie bei anderen keramischen Formgebungsverfahren – voraus, daß die von der Aufbereitung bereitgestellte Masse homogen ist. Das betrifft insbesondere die Feuchtigkeitsverteilung, die in der Praxis immer wieder Probleme bereitet. Bei der verfahrenstechnischen Gestaltung von Preßvorgängen zielen alle Bemühungen darauf ab, eine möglichst homogene Verdichtung mit ausreichender Festigkeit in allen Bereichen des Preßlings zu erreichen.

Eine homogene Verdichtung setzt die Gewährleistung eines allseitig konstanten Preßdruckes voraus, wie er theoretisch nur bei Flüssigkeiten unter Druck gegeben ist. Während beim isostatischen Pressen (s. Abschnitt 3.3.5.1.) dieser Forderung weitgehend entsprochen werden kann, ist man beim herkömmlichen Trockenpressen bemüht, die aus den auftretenden Gleitspannungen resultierende ungleichmäßige Druckverteilung durch geeignete Maßnahmen, z. B. eine spezielle Matrizengestaltung oder die Einführung von Preßhilfsmitteln, zu vermindern.

Angaben über den Verlauf der Druckverteilung und das Ausmaß des Druckdurchganges durch den Preßling wurden von *Haase* [2] gemacht. Die Druckverteilung, die während des Preßvorganges im Preßling vorliegt, kann sichtbar gemacht werden, wenn ein gepreßter Körper, z. B. aus Porzellanmasse, so gebrannt wird, daß die weniger verdichteten Stellen sich mit alkoholischer Fuchsinlösung unter Druck anfärben lassen. Die nach dieser Methode veranschaulichte Dichteverteilung zeigt Bild 3.41 in schematischer Darstellung [2].

Je nach der Gleitfähigkeit der Masse beträgt bei zylindrischen Preßlingen, deren Höhe gleich dem Durchmesser ist, der Druckdurchgang auf den Boden der Form nur noch 40 bis 70 % des

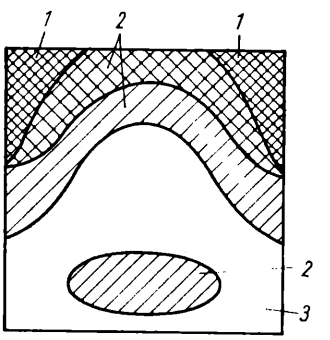


Bild 3.41. Dichteverteilung in Preßlingen mit einaxialer Druckaufgabe und feststehender Form [2]
1 Zone höchster Verdichtung, *2* Zonen mittlerer Verdichtung, *3* Zone niedrigster Verdichtung

aufgegebenen Druckes. Dieser Druckabfall hat zur Folge, daß die weniger stark verdichtete Seite des Preßlings beim Brennen stärker schwindet und ein ursprünglich zylindrischer Körper die Tendenz zu einem trapezförmigen Längsschnitt zeigt.

Von den Beschreibungen des Preßvorganges verdienen die von *Bouchner* [160] durchgeführten Experimente zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Preßweg und Preßdruck sowie die Angaben zur Berechnung der Arbeit und des Preßdurchganges Beachtung.

Die im folgenden ausgewiesenen Abhängigkeiten für das keramische Trockenpressen gelten für die einseitige Verpressung mit feststehender Form (s. auch Abschnitt 3.3.3.2.).

Untersucht wurde zunächst der Verlauf des angewendeten Preßdruckes p und der resultierenden Prüfkörperhöhe h. Bild 3.42 zeigt die Ergebnisse für eine Wandfliesenmasse. Bei der Darstellung in logarithmischen Koordinaten kann die Kurve für Preßdrücke oberhalb 0,1 MPa mit hinreichender Genauigkeit als eine Gerade betrachtet werden. Analytisch ausgedrückt, ergibt sich:

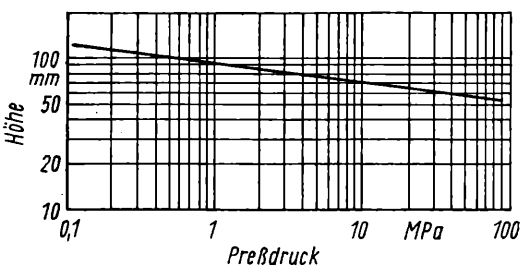


Bild 3.42. Abhängigkeit der Rohlingshöhe vom Preßdruck für eine Wandfliesenmasse [160]

$$p \left(\frac{h}{h_0}\right)^n = \text{const} \tag{3.12}$$

p Druck (in MPa)
h Höhe der komprimierten Masse (in mm)
h_0 Höhe der Masse vor dem Komprimieren (in mm)
n materialabhängige Konstante.

Bezogen auf die Preßkraft F gilt:

$$F\,h^n = F_1\,h_1^n = F_2\,h_2^n = \text{const}. \tag{3.13}$$

Der Exponent n kann für ein unbekanntes Material bestimmt werden, wenn dieses bei zwei verschiedenen Drücken zusammengepreßt und die dazugehörige Höhe der komprimierten Masse gemessen wird. *Bouchner* [160] hat für unterschiedliche keramische Materialien die in Tabelle 3.4 dargestellten n-Werte ermittelt.

Tabelle 3.4. Materialabhängige Konstanten für die Verdichtung beim Pressen (berechnet nach [160])

Material	n-Wert
Wandfliesenmasse (Feuchte 8,3 %)	8,3... 9
Bodenplattenmasse	9 ...11
Schamotte Al 52	16 ...20
Kaolinschamotte	18 ...20
Schamotte ST 1 (Feuchte 5,2 %)	16 ...18
Ziegelton »Satov«	9,8
Ziegelton »Malenovice«	10 ...11

Für die Berechnung der Arbeit W, die für das Zusammenpressen notwendig ist, gilt:

$$W = \int_{h_0}^{h_1} F\,\mathrm{d}h. \tag{3.14}$$

Nach Einsetzen von $\frac{F_1 h_1^n}{h^n}$ für F aus Gl. (3.13) ergibt sich für die Arbeit

$$W = \frac{F_1\,h_1}{1-n}\left[1 - \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^{n-1}\right] \quad \text{bzw.} \tag{3.15}$$

$$W = -\frac{F_1\,h_1}{n-1}, \tag{3.16}$$

wenn man berücksichtigt, daß für die vorliegenden hohen Werte von n der Term $\left(\frac{h_1}{h_0}\right)^{n-1}$ vernachlässigbar klein ist.

Bei der Berechnung des Druckdurchganges wird von den in Bild 3.43 ausgewiesenen Kräften und geometrischen Größen ausgegangen. Nach dieser Festlegung kann man folgendes Kräftegleichgewicht definieren:

$$p\,A - (p - \mathrm{d}p)\,A - U\,f\,\zeta_p\,p\,\mathrm{d}h = 0\,. \tag{3.17}$$

In dieser Gleichung sind A und U geometrische Größen, f der Koeffizient der äußeren Reibung an den Wänden der Form und ζ_p der Koeffizient des seitlichen Druckes. Von Bedeutung für das Durchpressen eines Rohlings ist das Produkt aus $\zeta_p\,f$, das in erster Näherung für den gesamten Bereich der Preßdrücke konstant ist. Durch Messung wurden von *Bouchner* [160] die in Tabelle 3.5 angegebenen Werte für $\zeta_p\,f$ ermittelt.

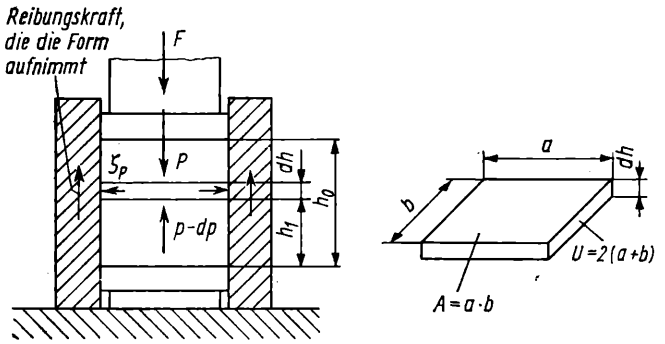


Bild 3.43. Parameter für die Berechnung des Druckdurchganges durch einen Preßling [160]

Tabelle 3.5. Produkt aus Reibungsbeiwert und Koeffizienten für die seitliche Druckübertragung in Trockenmatrizen (berechnet nach [160])

Masse	$\zeta_p f$
Wandbelagsplatten (Feuchte 8,3 %)	0,2
Bodenplatten	0,12...0,2
Schamotte Al 52	0,15
Kaolinschamotte	0,13
Ziegelton »Satov«	0,27
Ziegelton »Malenovice«	0,3

Die Lösung von Gleichung (3.17) führt zur Preßgleichung (3.18) für die Ermittlung des Druckdurchganges:

$$\mathrm{d}p\, A = U\, f\, \zeta_p\, p\, \mathrm{d}h$$

$$\int_{p_1}^{p_0} \frac{\mathrm{d}p}{p} = \int_{h_1}^{h_0} \frac{U f \zeta_p}{A}\, \mathrm{d}h$$

$$\ln p \Big|_{p_1}^{p_0} = \frac{U f \zeta_p}{A}\, h \Big|_{h_1}^{h_0}$$

$$\ln \frac{p_0}{p_1} = \frac{U f \zeta_p}{A} (h_0 - h_1)$$

$$\frac{p_0}{p_1} = \exp \frac{U f \zeta_p}{A} (h_0 - h_1)$$

$$p_1 = p_0\, \mathrm{e}^{-\frac{U f \zeta_p}{A}(h_0 - h_1)} \qquad (3.18)$$

p_1 Druckdurchgang (in MPa)
p_0 aufgegebener Druck (in MPa)
h_1 Höhe des Preßlings (in mm)
h_0 Höhe der Einschüttung (in mm)
U Umfang nach Bild 3.43 (in mm)
A Fläche nach Bild 3.43 (in mm²)
f Koeffizient der äußeren Reibung
ζ_p Koeffizient des seitlichen Druckes.

Auf eine spezielle Form der Preßgleichung, wie sie bei Anwendung der hydraulischen Pressen vom Typ PY für die Herstellung von Wandfliesen ermittelt wurde, wird in Abschnitt 4.3.4.1., Gln. (4.4) und (4.5), eingegangen.

Um den Durchgang des Preßdruckes zu verbessern und die Entstehung trapezförmiger Erzeugnislängsschnitte zu vermeiden, setzt man zum überwiegenden Teil Preßwerkzeuge ein, bei denen der Boden der Preßform ebenso wie der Oberstempel als selbständiger Stempel ausgebildet sind. Außerdem kann man mit Doppeldruck arbeiten, d. h., Ober- und Unterstempel bewegen sich mit gleicher Geschwindigkeit und gleicher Preßkraft aufeinander zu. Bild 3.44 zeigt einen Preßling nach gleichzeitigem doppelseitigem Pressen, s. auch Abschnitt 3.3.3.6. Man

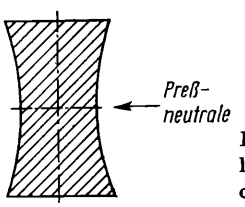


Bild 3.44. Gebrannter Preßling nach gleichzeitigem, doppelseitigem Pressen

erreicht dadurch, daß die Masse von oben und von unten mit dem gleichen Druck verdichtet wird und die Preßneutrale im wesentlichen in der Mitte des Preßlings zu liegen kommt. Für diesen Fall ist in der Preßgleichung (3.18) h_1 durch $\frac{h_0}{2}$ zu ersetzen, und es gilt:

$$p_1 = p_0\, \mathrm{e}^{-\frac{U f \zeta_p}{2A} h_0} \qquad (3.19)$$

Neben den Problemen des Druckdurchganges und der damit verbundenen gleichmäßigen Ver-

dichtung des Preßlings sind die des Zusammenhaltes der Teilchen, also der Grünfestigkeit eines Preßlings, von besonderem technologischem Interesse. Für diese Problematik ist der Bindungsmechanismus zwischen den Teilchen maßgeblich, der im Ergebnis des Preßvorganges wirksam wird.

Im wesentlichen haben folgende Kräfte und Faktoren einen Einfluß auf die Grünfestigkeit eines Preßlings [157]:

- Anziehungskräfte zwischen den Festkörperteilchen,
- Formschlüssige Bindungen und Bildung von Festkörperbrücken,
- Kapillardruck,
- Adhäsions- und Kohäsionskräfte bei Anwesenheit grenzflächenaktiver Preßhilfsmittel.

Eine gezielte Ausnutzung der *Anziehungskräfte* setzt die Berührung der Teilchen auf möglichst großer Oberfläche voraus. Je mehr Volumenprozente Feststoff bzw. je weniger Poren ein Preßling enthält, um so wirksamer wird dieser Bindungsanteil.

Formschlüssige Bindungen und die Bildung von *Festkörperbrücken* sind in erster Linie eine Frage der Korngeometrie. *Kapillardruck*, *Adhäsions-* und *Kohäsionskräfte* stehen beim Pressen in engem Zusammenhang mit der flüssigen und der Gasphase. Die Darstellungen dieser Zusammenhänge beinhalten die Abschnitte 3.3.2.2. und 3.3.2.3.

3.3.2.2. Einfluß des Körnungsaufbaues auf die Packungsdichte

Insbesondere für die Herstellung feuerfester Erzeugnisse ist der Kornaufbau der Masse eine entscheidende Voraussetzung für eine gute formschlüssige Bindung, die ihrerseits wichtige Eigenschaften des gebrannten Erzeugnisses, wie die Porosität, die Druckfestigkeit, die Temperaturwechselbeständigkeit, die Schlackenbeständigkeit, die Frostbeständigkeit u. a., maßgeblich beeinflußt. Die Anforderungen an den Kornaufbau sind außerordentlich vielschichtig und müssen immer erzeugnisbezogen gesehen werden, d. h. in Verbindung mit dem gesamten Herstellungsprozeß und dem späteren Einsatzgebiet des Erzeugnisses.

Für die erzeugnisspezifische Darstellung und Bewertung der Körnung wird das Körnungsdreistoffdiagramm benutzt [161]. Die im folgenden behandelten Körnungsmaßnahmen beschränken sich auf einen Formgebungsprozeß, bei dem alle Maßnahmen darauf abzielen, einen Preßling mit möglichst hoher Packungsdichte zu erreichen. Das bedeutet, daß die Druckfestigkeit, die Schlackenbeständigkeit und die Frostbeständigkeit hoch sind, die Temperaturwechselbeständigkeit aber gering ist.

Obwohl in der Praxis die Körner oftmals splittrig und sperrig sind, was für eine Bindung durch Verankerung und Verzahnung günstig ist, benutzt man für theoretische Überlegungen und Modellversuche der Einfachheit halber die kugelige Form der Körner. Bei Ein-Kugel-Packungen, d. h., die gesamte Masse besitzt nur Körner gleicher Größe, führen diese Überlegungen zu dem Ergebnis, daß sich bei Anordnung der Kugeln in einer Koordinationszahl von sechs (jede Kugel ist von sechs weiteren Kugeln umgeben) eine durch Maßnahmen der Formgebung nicht zu verringernde Porosität von 47,64 % ergibt, bei einer Koordinationszahl von acht 39,54 % und bei einer Koordinationszahl von zwölf 25,95 %.

Weitere theoretische Überlegungen ergeben, daß bei Verwendung von 3 Kugelgrößen mit $R_1 \gg R_2 \gg R_3$ die dichteste ternäre Mischung mit einer Porosität von 6,18 % entsteht, wenn eine Koordinationszahl von acht vorliegt und die Mischung aus den Anteilen 64,45 % Kugeln R_1, 25,25 % Kugeln R_2 und 10,07 % Kugeln R_3 besteht.

In der Praxis kann man mit Einkorngemischen eine Porosität von 45 % bei Massen bis etwa 0,3 mm Korngröße herunter erzielen [162]. Mischungen aus zwei Komponenten, deren Durchmesserverhältnis 1 : 10 beträgt, ergeben die dichtesten Rohlinge bei einem Mischungsverhältnis von 70 bis 55 % Grobkorn (meist über 1 mm) und 30 bis 45 % Feinkorn (meist unter 0,1 mm) [163].

Die theoretisch ermittelte Porosität von 6,18 % bei Anwendung von drei Körnungsgruppen wird in der Praxis ebenfalls nicht erreicht. Bei Verwendung mehrerer Körnungsgruppen ist eine Porosität der Preßlinge von etwa 16 % real. Das zusätzliche Einbringen von 10 bis 15 % Bindeton verschlechtert in solchen Mischungen die Packungsdichte nicht, da er infolge seiner ge-

ringen Teilchengröße die verbliebenen Hohlräume gut ausfüllt. Grundlegende Untersuchungen über die günstigste Korngrößenverteilung bei Verwendung aller Kornfraktionen wurden von *Fuller* [164], *Andreasen* [165] und *Litzow* [166] durchgeführt.

Nach *Andreasen* [165] kann eine möglichst dichte Mischung aus verschiedenen Kornklassen aufgebaut werden, wenn die Korngrößen nach einer geometrischen Reihe mit q als Parameter ausgewählt sind (s. Bild 3.45). Mit dieser Anordnung lassen sich Entmischungen, die bei stark unterschiedlichen Korngrößen auftreten können, beheben.

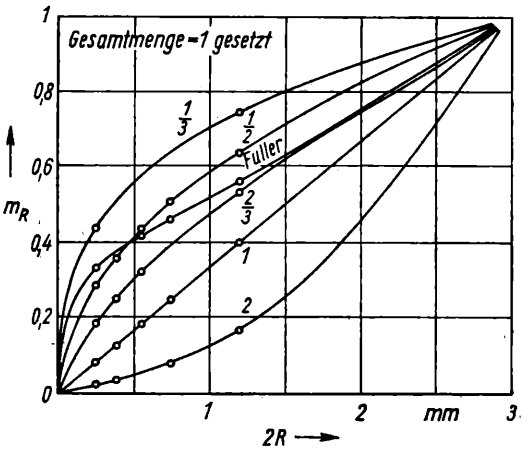


Bild 3.45. Korngrößen-Summenkurve für dichte Kugelpackungen ($q = 1/3$; $1/2$; $2/3$; 1; 2) [165]

Der Körnungsaufbau entspricht nach [163] der Beziehung

$$\frac{dm}{m} = q\frac{dR}{R}$$

oder integriert

$$m_R = \left(\frac{R}{R_{max}}\right)^q \qquad (3.20)$$

m_R gesamte Stoffmenge mit dem Radius $\leq R$ (in %)
m Stoffmenge, Masse der Körnung (in %)
R Radius (in mm)
R_{max} maximaler Radius der vorliegenden Körnung (in mm)
q Konstante.

Die Packungsdichte steigt mit abnehmendem q. Die für dichte Betonpackungen von *Fuller* und *Thomsen* [164] errechnete sogenannte *Fuller*-kurve (s. auch Bild 3.45) entspricht einer *Andreasen*verteilung von $q = \frac{2}{3}$ bis $\frac{1}{3}$.

Experimentelle Untersuchungen über die günstigste Korngrößenverteilung wurden von *Litzow* [166] für Rohschamotte zur Herstellung von Schamottesteinen, also mit Körnern unregelmäßiger Gestalt, durchgeführt. Für die Versuchsdurchführung benutzte er drei Kornklassen:

Fraktion A 2 bis 5 mm
Fraktion B 0,25 bis 2 mm
Fraktion C $<$0,25 mm.

Es ergab sich nach *Konopicky* [162] ein Dichtemaximum des geschütteten Materials und der unter Zusatz von 20 % Bindeton hergestellten Steine bei (A + B) $\approx$ 70 % und C $\approx$ 30 % mit A : B $\approx$ 1 : 1. Die Kurve der günstigsten Körnungsverteilung (s. Bild 3.46) zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die *Fuller*kurve.

Wie im vorliegenden Abschnitt bereits gesagt, werden in der Praxis diese Kurven der günstigsten Kornverteilung nicht immer erreicht. Die Zerkleinerung während des Pressens durch gegenseitiges Reiben der Körner oder Brechen führt zu wechselnden Korngrößen und Kornformen. Eine reibende Zerkleinerung bewirkt in der Regel abgerundetes und eine schlagende Zerkleinerung splittriges Korn. Spröde Materialien, wie z. B. Quarzit, ergeben splittrige Körner mit hohem Feinkornanteil und zähe Stoffe abgerundete Körner mit geringem Feinkornanteil. Die daraus resultierende Kornverteilung läßt sich – unabhängig von der Mahlart und der Korngröße – für den Feinkornanteil bis zu einer Korngröße von 1 mm durch das Exponentialgesetz von *Rosin*, *Rammler* und *Bennet*, s. Abschnitt 2.5.4., Gl. (2.27), beschreiben.

Die Einstellung der Kornverteilung nach dem Vorbild der *Fuller*kurve kann mit einem natürlichen Mahlgut nicht realisiert werden. Bei der Zerkleinerung nimmt das Mittelkorn auf Kosten des Grobkornes schneller als der für den Formgebungsprozeß notwendige Feinkornanteil zu.

Bei Einsatz von nur zwei Mahlkörnungen, z. B. 0 bis 5 mm und 0 bis 0,5 mm, nähert sich die Kornverteilung des Gemisches in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis der dichtesten Packung an [162]. Man macht sich im Betrieb die Verwendung von zwei verschiedenen Mahlgütern gern zunutze, um Restmengen zu vermeiden. Körnungen solcher Gemische, insbesondere feuerfester Massen, besitzen dann im allgemeinen keine *Rosin-Rammler-Bennet*-Verteilung.

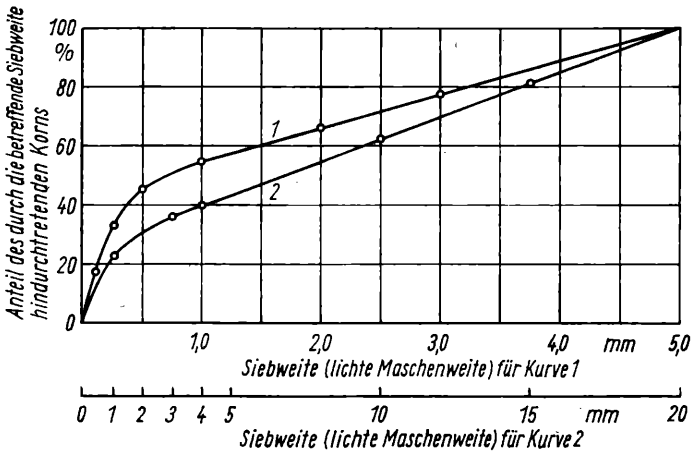


Bild 3.46. Korngrößenverteilung für dichte Packungen

1 Schamottekörner [166], *2* für Betonzuschlagstoffe [164]

Die Korngrößenverteilung der Masse kann sich nach dem Preßvorgang grundlegend ändern. Untersuchungen von *Konopicky* [162] zeigten, daß das Korn beim Pressen trotz einaxialer Druckaufgabe aufgrund der gegenseitigen Abstützung der Körner weitgehend einem gleichmäßigen dreiachsigen Druck ausgesetzt ist, der in Abhängigkeit vom Ausmaß des Druckes und der Materialart zu einer mehr oder weniger starken Zerkleinerung der Körner bei Überschreiten ihrer Eigenfestigkeit führt. Diese Erscheinung tritt insbesondere bei Drücken oberhalb 50 MPa auf. Mit der Druckzerkleinerung beim Pressen nähert sich der Kornaufbau wieder der *Rosin-Rammler-Bennet*-Verteilung.

3.3.2.3. Wirkung von Preßhilfsmitteln

Das Bemühen um eine homogene Packungsdichte und die Herstellung tonmineralfreier Erzeugnisse durch Trockenpressen haben die Notwendigkeit des Einsatzes von Preßhilfsmitteln und das wissenschaftliche Interesse bezüglich ihrer Wirkung stark unterstützt. Preßhilfsmittel werden eingesetzt, um ein Ankleben der Masse an der Stahlmatrize zu vermeiden sowie um die Gleitfähigkeit der Teilchen und damit die Verdichtung der Masse zu verbessern. Einige Preßhilfsmittel haben auch die Funktion eines Bindemittels und verbessern die Haftung der Teilchen untereinander.

Die Notwendigkeit der Verbesserung der Gleitfähigkeit der Teilchen resultiert in erster Linie aus dem Druckabfall in Preßrichtung, der, wie in Abschnitt 3.3.2.1. erläutert wurde, eine Folge der auftretenden Scherspannungen ist und zu einer inhomogenen Verdichtung des Preßlings führt. Diese Erscheinung hat eine große technische Bedeutung, da die Brennschwindung nach einem Exponentialgesetz vom Preßdruck abhängt [38] und im Ergebnis dessen verfälschte Erzeugnisdimensionen entstehen.

Untersuchungen von *Haase* [38] zum Druckdurchgang führten bei Verwendung von Kemmlitzer Kaolin zu den Ergebnissen auf Bild 3.47. Die Versuche sind als experimenteller Nachweis für den exponentiellen Verlauf des Druckes über der Höhe des Preßkörpers entsprechend Gl. (3.18) zu werten und verdeutlichen den Einfluß der Preßhilfsmittel. Die beste Gleitfähigkeit er-

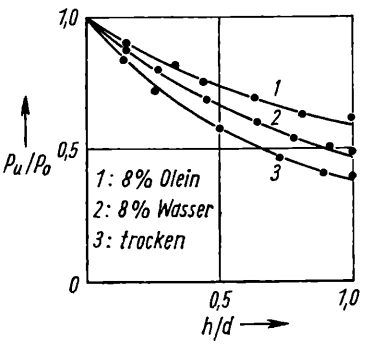


Bild 3.47. Druckdurchgang durch Preßlinge aus Kemmlitzer Kaolin [38]

p_o Druck oben, p_u Druck unten, h Höhe des Preßlings, d Durchmesser des Preßlings

gibt sich bei Verwendung von Olein als Preßhilfsmittel. Bei Wasser ist sie geringer und bei Verwendung trockener Substanz am schlechtesten. Für $h/d = 1$, also quadratischen Längsschnitt, beträgt bei Zusatz von 8 % Wasser der Unterstempeldruck nur noch 50 % vom Oberstempeldruck.

Der Einfluß der Höhe h wird bei der industriellen Fertigung berücksichtigt, indem man vorwiegend flache Erzeugnisse preßt oder das liegende Pressen, also in Richtung der kleinsten Kante, bevorzugt.

Die Materialabhängigkeit des Druckdurchganges wird besonders beim Verpressen von Talkum und Speckstein deutlich. Für diese Materialien, die sich sehr gut verpressen lassen, wird im Vergleich zum Kemmlitzer Kaolin bei einem Zusatz von 6 % Wasser ein Druckdurchgang von 70 bis 80 % erreicht [38].

Die Wirksamkeit eines Preßhilfsmittels auf den Druckdurchgang wird bei einem Standardversuch am günstigsten durch den Quotienten K aus Boden- und Preßdruck wiedergegeben. Für die Ermittlung des Quotienten K ist vorauszusetzen, daß die zu pressende Pulvermenge stets konstant bleibt, da nach *Hausner* und *Sheinhartz* [167] K eine nichtlineare Funktion der gepreßten Pulvermenge ist.

Den Einfluß der Preßatmosphäre auf den Druckdurchgang bzw. den Kraftdurchgriff zeigen Untersuchungen von *Frisch* und *Smidoda* [168]. In Bild 3.48 sind der Kraftdurchgriff beim Verpressen von TiO_2- und α-Al_2O_3-Pulver in Luft und im Hochvakuum aufgetragen. Um anhaftendes Wasser zu eliminieren, wurden bei den Hochvakuumversuchen die Proben bei 300 °C ausgeheizt. Zuzüglich der ohne Ausheizen im Vakuum gewonnenen Meßwerte ergeben sich nach Bild 3.48 die in Tabelle 3.6 zusammengestellten K-Werte.

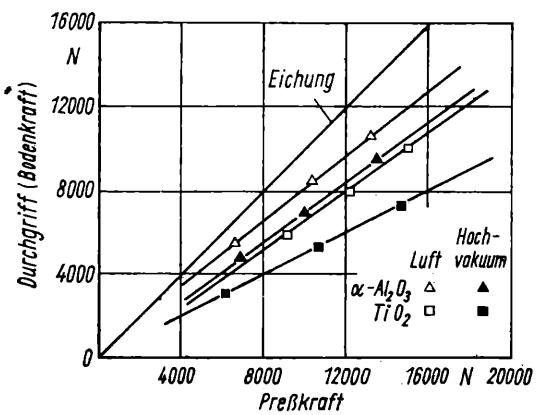


Bild 3.48. Kraftdurchgriff beim Verpressen von TiO_2- und α-Al_2O_3-Pulver in Luft und Hochvakuum [168]

Tabelle 3.6. Quotienten K aus Boden- und Preßdruck (berechnet aus Bild 3.48)

Substanz	K_L	K_V 1,33 mPa	K_{HV} 0,133 mPa
α-Al_2O_3	0,80	0,77	0,66
TiO_2	0,68	0,52	0,52

Bei Beibehaltung des linearen Zusammenhangs zwischen Durchgriff und Preßkraft ergibt sich nach Bild 3.48 und Tabelle 3.6 für beide Pulverarten eine deutliche Verringerung des Druckdurchganges im Vakuum. Diese Druckverluste resultieren primär aus einer Zunahme der Wandreibung, die mit der interpartikulären Reibung in unmittelbarer Verbindung steht. Die genannten K-Werte zeigen deutliche Differenzen für TiO_2 und Al_2O_3. Diese Unterschiede resultieren aus dem Vermögen einer Substanz, Wasser zu adsorbieren und die Oberflächenrauhigkeit zu vermindern. Die Differenzen zwischen K_L und K_V für TiO_2 sowie K_V und K_{HV} für α-Al_2O_3 liegen im Desorptionsverhalten dieser Substanzen begründet. Während α-Al_2O_3 das Wasser erst nach dem Ausheizen bei 300 °C vollständig abgibt, da auch chemisorbiertes Wasser vorliegt, besitzt das Wasser des TiO_2 eine nicht so feste Bindung. Im allgemeinen wird das Wasser durch Physisorption und Chemisorption gebunden. Die Behandlung im Vakuum ohne Ausheizen führt lediglich zur Verminderung der Physisorption. Durch zusätzliches Ausheizen werden sowohl das physi- als auch das chemisorbierte Wasser beseitigt.

In engem Zusammenhang mit dem Druckdurchgang stehen die Rohdichten. Wie erheblich der Einfluß eines Preßhilfsmittels, im einfachsten Falle Wasser, auf die Verdichtung des Preßlings ist, zeigt Bild 3.49 für eine feinkeramische Sprühmasse [157]. Die Rohdichten steigen hiernach bis zu einer zugesetzten Wassermenge von 8 %. Höhere Wassermengen bringen erfahrungs-

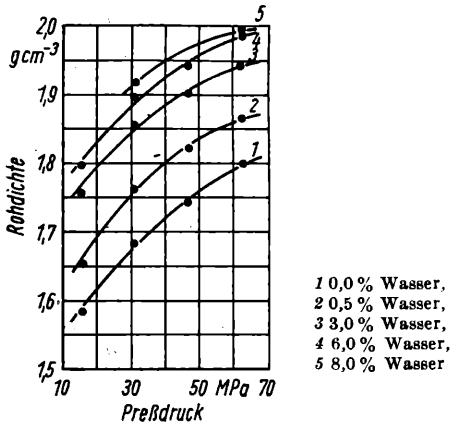


Bild 3.49. Einfluß des Preßhilfsmittels (Wasser) auf die Rohdichte einer feinkeramischen Sprühmasse [157]

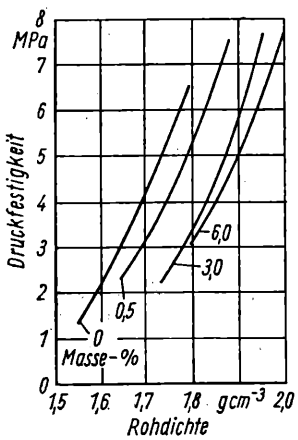


Bild 3.50. Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte für Sprühkornmassen unterschiedlicher Feuchte [157]

gemäß keine weitere Verdichtung, da sich das Wasser dann wie ein Ausbrennstoff verhält und quasi der Übergang zum Naßpressen mit geringerer Möglichkeit der Verdichtung erfolgt.

Für die Anwendung des Preßverfahrens ist besonders die im Ergebnis des Preßvorganges erreichte hohe Festigkeit maßgebend. Nach *Frisch* u. a. [157] ergibt sich für die feinkeramische Sprühkornmasse eine Abhängigkeit zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte gemäß Bild 3.50. Bei gegebener Preßfeuchte führt eine Zunahme der Rohdichte zu einer erheblichen Festigkeitssteigerung. Geht man jedoch von einer konstanten Rohdichte aus, was gleichbedeutend mit gleicher Teilchen- bzw. Haftstellenzahl in der Volumeneinheit ist, dann ergibt sich mit zunehmendem Wassergehalt eine Verringerung der Festigkeit. Die Ursache für dieses Verhalten liegt darin begründet, daß die Anwesenheit des Wassers die Abschirmung der Anziehungskräfte zwischen den Festkörperteilchen bewirkt. Bei entsprechend hohen Wassergehalten führt dieser Vorgang bis zur Auflösung der Sprühkorntextur. Da eine Zugabe von Wasser einerseits die Rohdichte erhöht und andererseits die Druckfestigkeit verringert, stellt die richtige Dosierung ein Optimierungsproblem dar.

Ähnlich wie Wasser verhalten sich auch Preßhilfsmittel, die vorzugsweise bei Preßmassen eingesetzt werden, die aufgrund fehlender Tonmineralien oder anderer Schichtmineralien beim Verpressen Schwierigkeiten bereiten.

Untersuchungen über den Einfluß organischer Säuren mit polarer Carboxylgruppe auf die Verdichtung von α-Al_2O_3 ergaben ebenfalls eine Zunahme der erzielten Rohdichten [168]. Die organischen Säuremoleküle mit polarer Carboxylgruppe werden an den Feststoffteilchen adsorbiert, indem die langkettigen Moleküle eine senkrechte Anordnung zur Oberfläche des Teilchens zeigen. Die Abschirmung der Körner ist dabei um so vollkommener, je größer die Kettenlänge der Adsorbate ist. Ihr Einfluß auf die Druckfestigkeit ist demnach zunächst ähnlich negativ wie der des Wassers nach Bild 3.50. Ein Vergleich der Druckfestigkeiten bei konstanter Porosität, d. h. konstanter Rohdichte, ergibt auch hier die größte Festigkeit, wenn die Preßmasse im Hochvakuum ausgeheizt und kein Preßhilfsmittel zugegeben wird. Bereits chemisorbierte Hydroxylgruppen bewirken ein Auseinanderrücken der Haftpartner und dadurch eine deutliche Verringerung der Druckfestigkeit. Durch die Anwesenheit des organischen Preßhilfsmittels rücken die Masseteilchen noch stärker auseinander, und die Haftkräfte, die im wesentlichen aus *Van-der-Waals*schen Kräften resultieren, werden abgeschirmt.

Die praktische Bedeutung des Einsatzes von organischen Kettenmolekülen mit aktiver Gruppe besteht deshalb vor allem darin, daß sie nicht nur am Massekorn haften, sondern auch an der Formenwand. Die dadurch entstehende Schmierschicht – in der Schmiertheorie mit Epilamenschicht bezeichnet – verbessert den Druckdurchgang und damit die Rohdichte. Die Schmier-

schicht ist als einmolekulare Lage geordneter Kettenmoleküle anzusehen, die eine außerordentliche Härte und Beständigkeit besitzt. Preßversuche von *Haase* [38] mit einer Steingutmasse und Olein ergaben, daß diese Epilamenschicht ohne weiteres acht Preßversuche übersteht und erst nach dem zehnten Mal verschwindet. Diese Tatsache zeigt, daß es nicht immer notwendig ist, die ganze Masse durchzufetten. Ein Einstreichen der Form ist in vielen Fällen ausreichend. Organische Fettsäuren werden vorwiegend für hochwertige Preßerzeugnisse eingesetzt.

Um das Ankleben der Masse an Ober- und Unterstempel zu vermeiden, werden der Masse auch Abfallöle zugesetzt, die in ihrer Konsistenz zwischen den Treibstoffen und den Schmierölen liegen [2]. In der Plattenindustrie werden Ober- und Unterstempel elektrisch beheizt, s. auch Abschnitt 4.3.4.2.

3.3.2.4. Besonderheiten beim Verpressen von Sprühgranulat

Aufgrund seiner guten Rieselfähigkeit ist Sprühgranulat vorzüglich zum Pressen, insbesondere zum isostatischen Pressen (s. Abschnitt 3.3.5.) geeignet. Im Vergleich zu den herkömmlichen Trockenpreßmassen stellen die Körner des Sprühgranulates eine Vereinigung von Individualpartikeln dar. Je nach der Art des Masseversatzes wird diese Vereinigung ausschließlich durch die Teilchen oder durch Zugabe eines Bindemittels, auch Binder genannt, erreicht.

Bindemittel im Sinne der Sprühtrocknung und des Trockenpressens sind organische Klebemittel, wie PVA, Dextrin, Wachsemulsionen, Stearate, Oleate u. a., die den Zusammenhalt der Teilchen erhöhen und die Gleiteigenschaften des Korns beim Verdichten verbessern [169, 170]. Als Faustregel gilt, daß Bindemittel nur dann zugesetzt werden, wenn die Eigenfestigkeit der Granalien und die Rohbruchfestigkeit des Preßlings nicht ausreichend hoch sind.

Das ist z. B. bei den oxidkeramischen Massen der Fall, die infolge zu geringer Eigenfestigkeit des Sprühkorns eine ungenügende Rieselfähigkeit besitzen. Tonmineralhaltige Massen werden in Abhängigkeit vom Erzeugnis und vom Preßverfahren mit oder ohne Bindemittel hergestellt. So enthalten z. B. Sprühgranulate für die Herstellung von Wandfliesen keine Bindemittel. Auch bei Elektroporzellanmassen für das isostatische Pressen von Hubeln ist man bemüht, ohne Binder auszukommen. Anders sind die Bedingungen beim isostatischen Pressen von Geschirrartikeln. Hier ist die Zugabe eines Binders, wie noch gezeigt wird, von Vorteil.

Die Zugabe organischer Klebstoffe erfolgt in der Regel vor der Sprühtrocknung. Das hat zur Folge, daß die Viskosität des Schlickers ansteigt und auch der physikalische Ablauf der Sprühtrocknung wesentlich verändert wird. Mit der Verdunstung des Wassers während des Sprühvorganges wird gleichzeitig der Binder an die Oberfläche der Granalie geführt. Aufgrund seiner höheren Verdampfungstemperatur reichert er sich auf der Oberfläche der Granalie an und behindert die Verdunstung des Wassers. Der sich im Innern aufbauende Dampfdruck wird durch die zunehmende äußere Verfestigung der Granalie so groß, daß sich im Innern ein Hohlraum ausbildet. Bei weiterer Steigerung des Dampfdruckes platzt die dünne Granulatwand. Der Innendruck baut sich schlagartig ab, und die Granalie fällt an der Stelle des Dampfaustrittes in sich zusammen. Der Hohlraum der Granalien soll möglichst klein sein, damit nicht zuviel Volumenarbeit beim Preßvorgang geleistet werden muß. Aus diesem Grunde ist nach Möglichkeit ohne bzw. mit geringen Binderzusätzen zu arbeiten.

Extrem hohe Bindergehalte führen zu einer Verlängerung der Trockenzeit und zu klebrigen Granulatoberflächen. Die Folge davon ist ein Ankleben kleiner Granalien an große, der sogenannte Brombeereffekt. Diese unerwünschte Erscheinung beeinträchtigt vor allem die Rieselfähigkeit des Granulats.

In engem Zusammenhang mit der Zugabe von Bindemitteln steht die Granulatfeuchte. Die *Feuchtigkeit* beeinflußt die Verarbeitbarkeit des Sprühkornes und die Rohdichte des Preßlings. Ist die Granulatfeuchte sehr niedrig, z. B. bei einer Porzellanmasse $<0{,}5\,\%$, dann ist das Korn hart und schwer verformbar. Es werden extrem hohe Preßdrücke für die Verdichtung benötigt, und die Rohdichte des Preßlings ist, wie das schon Bild 3.49 zeigte, geringer als bei einer höheren Feuchte.

Wählt man dagegen eine höhere Feuchte, dann

erfolgt wegen der geringen Härte des Korns eine bessere Verdichtung, und die Rohdichte des Preßlings nimmt zu.

Weiterhin tritt bei zu trockenen Granulaten als Folge des spröd-elastischen Verhaltens der Körner eine große Rückdehnung (s. auch Abschnitt 3.3.5.2.) nach dem isostatischen Pressen auf. Mit zunehmender Granulatfeuchte nimmt die Rückdehnung ab und geht schließlich in Schwindung über, was bei größeren Wassergehalten zur Folge hat, daß die Erzeugnisse vor dem Sintern getrocknet werden müssen.

Während man beim Pressen von Fliesen (s. Abschnitt 4.3.4.2.) mit einer Granulatfeuchte von 5 bis 8 % arbeitet, wird für das isostatische Pressen von Hubeln bei der Isolatorenfertigung (s. Abschnitt 3.3.5.4.) eine Granulatfeuchte von 1,2 ± 0,5 % angestrebt [169]. Das isostatische Pressen von Flachgeschirr (Abschnitt 3.3.5.4.) erfolgt bei einer Granulatfeuchte von 1,5 bis 2,5 % bei gleichzeitiger Anwesenheit eines Bindemittels.

Die niedrigen Feuchten beim isostatischen Pressen verhindern sonst vorhandene Entlüftungsprobleme bei der Verdichtung der Masse. Bei einem Feuchtigkeitsgehalt des Sprühkornes von etwa 1 % kommt es während des Preßvorganges zu keiner merklichen plastischen Verformung [171]. Damit ist gewährleistet, daß während der Druckbeaufschlagung die zwischen den Körnern eingeschlossene Luft entweichen kann und die sogenannte Schieferbildung vermieden wird. Bei voller Druckbeaufschlagung brechen die Sprühkörner, und es kommt zu einer Verzahnung der einzelnen Teilchen. Je höher der Feuchtigkeitsgehalt des Sprühgranulates nun ist, um so eher setzt seine plastische Verformung ein und um so schwieriger wird die Entlüftung der Masse. Aus dieser Sicht müßte das Verpressen bei einem möglichst niedrigen Feuchtigkeitsgehalt der Masse erfolgen. Dem wiederum steht gemäß Bild 3.49 entgegen, daß die Rohdichte des Scherbens mit zunehmender Feuchtigkeit ansteigt, denn eine höhere Preßfeuchte hat eine bessere Einbindung der Teilchen durch plastische Deformation zur Folge.

Im Interesse einer besseren Entlüftung strebt man beim isostatischen Pressen von Porzellangeschirr eine niedrige Feuchtigkeit des Preßgranulates an und setzt der Masse ein Bindemittel zu, das dennoch die höheren Festigkeiten

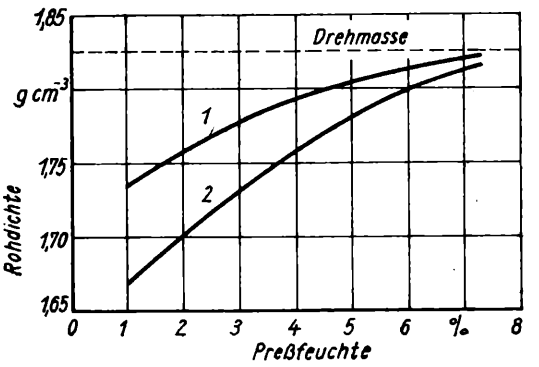


Bild 3.51. Rohdichte in Abhängigkeit von der Preßfeuchte beim isostatischen Pressen von Geschirrporzellan [171]
1 mit Bindemittel, *2* ohne Bindemittel

möglich macht. Mit der Verbesserung der Gleiteigenschaften des Korns durch das Bindemittel wird, wie Bild 3.51 für eine Porzellanmasse zeigt, die Rohdichte des Preßlings erhöht [171]. Zu bemerken ist allerdings, daß auch durch die Zugabe des Bindemittels die hohe Rohdichte, die bei der plastischen Formgebung möglich ist, nicht erreicht wird. Bedingt durch die vorherige Homogenisierung und Evakuierung, stellt die plastische Drehmasse eine homogene Mischung dar. Das ist bei Sprühgranulat anders. Das Vorliegen des Granulates und die nicht immer optimale Korngrößenverteilung haben zur Folge, daß nach dem Pressen ungleichmäßige und prozentual mehr Freiräume vorhanden sind. Dieser Unterschied ist um so gravierender, je niedriger die Feuchtigkeit des Granulates ist, weil dann das Gleiten und die Umorientierung der Teilchen bei der Verdichtung besonders behindert werden.

Eine sehr wichtige Eigenschaft des Sprühgranulates ist sein Kornband, weil davon die Schütt-dichte und die Rütteldichte abhängen. Damit nicht zu viel an Volumenarbeit beim Preßvorgang geleistet werden muß, sollten die Schütt-dichte und die Rütteldichte möglichst hoch sein. Die beim Sprühen erreichten Korngrößen sind vom Trocknertyp und von den verfahrenstechnischen Parametern abhängig. Im allgemeinen liefern Düsenzerstäuber eine mittlere Korngröße von 250 µm und Scheibenzerstäuber eine von etwa 150 µm. Durch Variation der Verfahrensparameter, wie Feststoffgehalt des Schlickers,

Düsendurchmesser, Bindemittelzusatz und Pumpendruck, lassen sich die Korngrößen geringfügig beeinflussen.
Ein geeignetes Kornband für das isostatische Pressen von Elektroporzellanmassehubeln hat folgendes Spektrum [169]:

>400 µm	0,5 %
315...400 µm	2... 8 %
200...315 µm	44...54 %
125...200 µm	23...33 %
<125 µm	6...12 %.

Die Schüttdichte liegt dann bei etwa 0,92 bis 0,99 g cm^{-3} und die Rütteldichte bei etwa 1,15 bis 1,20 g cm^{-3}.
Beim Arbeiten mit Bindern ist im Interesse einer hohen Schüttdichte darauf zu achten, daß die Granalien nicht zu große Hohlräume ausbilden.

3.3.3. Möglichkeiten der verfahrenstechnischen Gestaltung von Preßvorgängen

3.3.3.1. Übersicht

Das Verpressen von Korngemischen erfolgt in allseitig geschlossenen Formen, bei denen eine oder mehrere Begrenzungsflächen aufeinanderzu bewegt werden. Nach der Art der Ausführung kann man im wesentlichen drei Möglichkeiten der verfahrenstechnischen Gestaltung von Preßvorgängen unterscheiden [172]:

- Pressen mit einseitigem Druck,
- Pressen mit doppelseitigem Druck,
- Pressen durch Zweiseitendruck als Nacheinanderdruck.

Das Pressen mit *einseitigem* Druck ist durch einen Bewegungsablauf gekennzeichnet, bei dem sich eine Preßfläche auf die gegenüberliegende, feststehende Fläche zu bewegt. Im Pressenbau wird in der Regel der Druck von unten oder von oben angewandt. Beim Druck von unten wird der Unterstempel gegen die obere Fläche geschoben, bei Oberdruck entsprechend umgekehrt. Es gibt auch Pressen, bei denen der Preßdruck von der Seite aufgebracht wird. Diese »liegenden« Pressen sind noch eine Ausnahme und haben bisher nicht die industrielle Bedeutung wie die zuerst genannten.

Nach *Welter* [172] arbeiten Pressen mit einseitigem Oberdruck bzw. Unterdruck (d. h. Druck von unten) nach verschiedenen Preßmethoden:

- einseitige Verpressung mit feststehender Form,
- einseitige Verpressung mit abgefederter Form,
- einseitige Verpressung mit hydraulisch über Druckspeicher, Überdruckventil oder andere Vorrichtungen gestützter Form.

Bei *zweiseitiger* Verpressung unterscheidet man ebenfalls:

- Zweiseitendruck bei feststehender Form und
- Zweiseitendruck mit abgefederter oder hydraulisch gestützter Form.

3.3.3.2. Einseitige Verpressung mit feststehender Form

Dieser Preßvorgang, der bereits unter Punkt 3.3.2.1. bei der Herleitung der Preßgleichung eingehend behandelt wurde, kann durch die in Bild 3.52 dargestellte Anordnung von Form und Stempel beschrieben werden.

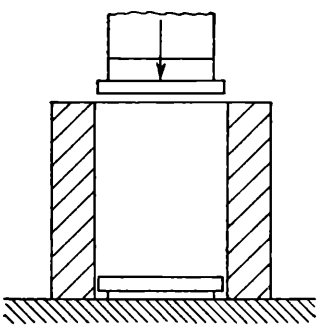


Bild 3.52. Anordnung von Form und Stempel bei einseitiger Verpressung mit feststehender Form

Der Verlauf der Preßkurve nach Bild 3.53 zeigt, daß sich die Trockenpreßmasse bei geringem Druck weit vorpressen läßt. Im Punkt *B* wird der Preßvorgang zum Zwecke des Entlüftens unterbrochen und danach bis zur Endhöhe des Preßlings fortgesetzt. Dieses Kraft/Weg-Verhalten steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Körnerbewegung beim Pressen. Am Druckstempel beginnend, werden in der ersten Phase der Verdichtung die Körner aufeinandergeschoben. Die Hohlräume zwischen den Körnern ver-

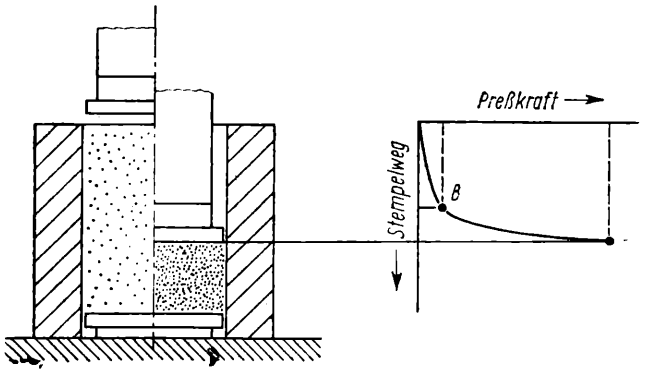


Bild 3.53. Preßkurve für einseitige Verpressung mit feststehender Form [172]

ringern sich, und die Luft entweicht beim Vorpressen von innen nach außen. Mit zunehmender Verdichtung wird der Austritt der Luft behindert, und es kommt in einigen Zonen zu einer Verspannung, die ein Anhalten der Presse zum Zwecke der Entlüftung notwendig macht. Erst nach Entweichen der komprimierten Luft erfolgt die endgültige Verdichtung der Masse.

In Abhängigkeit von der verwendeten Preßmasse sowie von der Größe und Gestalt des Preßlings wird der Entlüftungsvorgang gestaltet. Im Normalfall genügt ein kurzes Zurückziehen des Stempels. Bei einigen Erzeugnissen erfolgt die Entlüftung in mehreren Verdichtungsphasen. Nachdem die Luft beseitigt ist und eine gewisse Vorverdichtung vorliegt, kommt es zu einem starken Anstieg des Preßdruckes bei abnehmender Stempelbewegung je Druckeinheit. Bei einigen wenigen Preßmassen und Erzeugnissen mit geringer Höhe kann man auch auf die Entlüftung verzichten.

Den theoretischen Weg, den die Körner beim einseitigen Pressen zurücklegen, zeigt Bild 3.54. Hiernach müssen die am Druckstempel anliegenden Körner den größten Weg zurücklegen. Mit zunehmender Entfernung vom Druckstempel verringert sich der Verdichtungsweg und beträgt schließlich für das am ruhenden Stempel anliegende Korn Null. Der größere Verdichtungsweg der dem Druckstempel benachbarten Körner ermöglicht ihnen, eine Kornlagerung mit dichter Packung anzunehmen. Zum anderen haben diese Körner die größere Reibungsarbeit zu leisten, die bei genügend hohen Drücken bis zu ihrer Zerkleinerung führt. Da die Preßkraft von Korn zu Korn weitergegeben wird, nimmt außerdem der Druckdurchgriff mit der inneren

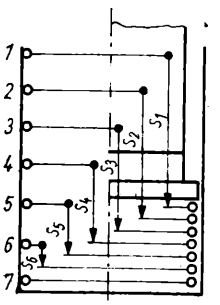


Bild 3.54. Verdichtungsweg für die Massekörner bei einseitiger Verpressung mit feststehender Form [172]
s_1 bis s_6 Weg, den die Körner 1 bis 6 beim Pressen zurücklegen

und äußeren Reibung, der elastischen Verformung und anderen Verlusten ab. Aus dem Bewegungsablauf der Körner und aus dem Druckdurchgang erklären sich solche Erscheinungen, wie z. B. die Dichteverteilung im Preßling (s. Bild 3.41). Bei der Gestaltung von Preßvorgängen trägt man dieser Erscheinung u. a. dadurch Rechnung, indem die Form beweglich gelagert, d. h. mit »fliegendem« Mantel gearbeitet wird, s. Abschnitte 3.3.3.3. und 3.3.3.4.

3.3.3.3. Einseitige Oberdruckverpressung mit beweglichen Formen

Eine Verbesserung der einseitigen Verpressung wird erreicht, wenn die Form gemäß Bild 3.55 mit einer Spiralfeder oder gemäß Bild 3.56 hydraulisch *abgefedert* wird.

Bei flüchtiger Betrachtung könnte man annehmen, daß diese Verdichtung einer Zweiseitenpressung gleichkommt. Um eine gleichmäßige Verpressung im Sinne einer zweiseitigen zu bewirken, müßte jedoch die Feder oder die hydraulische Einrichtung so bemessen sein, daß sie

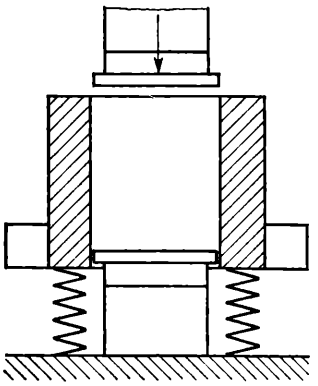


Bild 3.55. Mit Spiralfedern abgefederte Form (einseitige Verpressung)

Form bei Einwirkung des Preßdruckes beschreiben, zeigt Bild 3.57 [172]. Ohne daß eine Formenbewegung einsetzt, steigt zunächst der Druck von 0 bis A und bewirkt eine weitgehende Vorverdichtung des Materials. Bei weiterer Drucksteigerung bewegt sich die Form infolge der zunehmenden Reibung abwärts. Am Punkt B wird der Preßvorgang zum Zwecke der Entlüftung unterbrochen. Die Lage von Punkt B auf der Kurve ist von der Preßmasse und vom zu pressenden Erzeugnis abhängig.

Aus dem Kurvenverlauf leitet sich die Aussage ab, daß sich die Wege, die die Körner während der Verpressung zurücklegen, nicht wesentlich von denen bei der Verpressung mit unbeweglicher Form unterscheiden. Dementsprechend

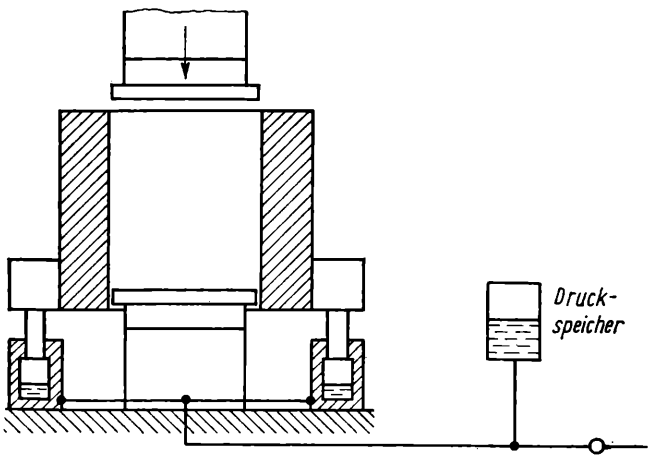


Bild 3.56. Hydraulisch über Druckspeicher abgefederte Form (einseitige Verpressung)

schon bei geringer Krafteinwirkung des Preßstempels durch entsprechende Mitnahme der Form reagiert. Das ist aber nicht der Fall. Der hohe Preßdruck, die Berücksichtigung der Federermüdung und andere Faktoren machen die Bemessung ausreichend hoher Federkräfte notwendig, die die Anforderungen der Formenmitnahme in der Anfangsphase der Verdichtung nicht erfüllen. In gleicher Weise verhält sich eine hydraulische Abfederung, bei der das verdrängte Flüssigkeitsvolumen in einem Druckspeicher aufgenommen wird. Im Ergebnis dessen erscheint die Preßneutrale nicht in Preßlingsmitte, sondern wird zum Unterstempel hin verschoben.

Die Bewegungen, die der Oberstempel und die werden auch die Druck- und Dichteverteilung bei abgefederter Form nur in geringem Maße verbessert und ähneln der für feststehende Formen. Der eigentliche Vorteil des Einsatzes abgefederter Formen besteht darin, daß durch das Absenken der Form die Randkörner infolge Reibung mitgenommen werden. Daraus resultiert eine bessere Verdichtung in den unteren Randzonen, die sich in einer besseren Kantenfestigkeit niederschlägt.

Eine weitere Möglichkeit der Formenlagerung ist die *hydraulische Abstützung* der Form, s. auch Abschnitt 3.3.3.1., und die Einstellung mittels Überdruckventils nach Bild 3.58. Das Prinzip dieser Ausführung besteht darin, daß ab einem bestimmten Reibungsdruck ein Teil der Flüssig-

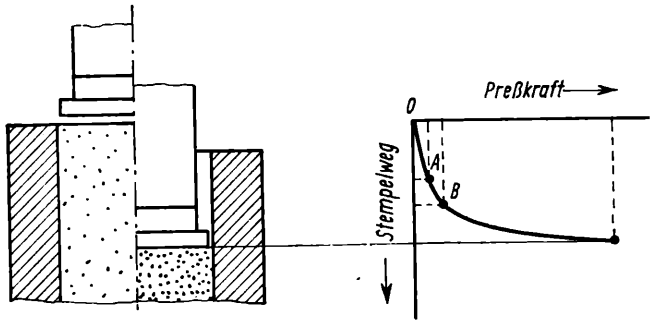


Bild 3.57. Bewegungen bei abgefederter Form und einseitiger Verpressung [172]

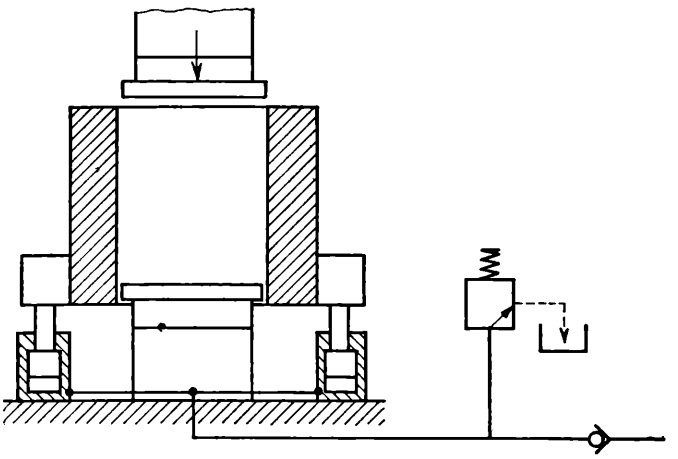


Bild 3.58. Hydraulische Abstützung von Formen mittels Überdruckventils

keit, die die Form hydraulisch stützt, über ein Überdruckventil abgegeben wird. Der Beginn der Formenabwärtsbewegung kann durch die Einstellung des Überdruckventils vorgegeben werden. Über eine Pumpe wird dem System die abgegebene Flüssigkeitsmenge wieder zugeführt. Diese Variante hat gegenüber den beiden erstgenannten Möglichkeiten der Abstützung den Vorteil, daß sich die Verdichtung unter gleichmäßigeren Bedingungen vollzieht. Eine wesentliche Verbesserung der Erzeugnisqualität wird aber nicht erreicht, da sich die Preßkurve kaum von der nach Bild 3.57 unterscheidet. Der Stein zeigt die zusätzliche Verdichtung der äußeren Randzone, ist aber nach wie vor einseitig gepreßt.

Eine Maschine zur einseitigen Oberdruckverpressung mit beweglichen Formen wird ausführlich in Abschnitt 4.3.4.3. beschrieben.

3.3.3.4. Einseitige Unterdruckverpressung mit beweglichen Formen

In ähnlicher Weise wie bei der Oberdruckverpressung erfolgt die Abstützung der Form beim Unterdruckverpressen. Bild 3.59 zeigt die schematische Darstellung einer Anordnung mit Spiralfeder. Anstelle der Federn werden auch hydraulische Druckkolben angewandt, die mit konstantem und regelbarem Druck beaufschlagt werden. In dem Maße, wie durch die Formenwandreibung die Kolben niedergedrückt werden, erfolgt die Flüssigkeitsabgabe an das Leitungsnetz.

Die Vorgänge, die sich beim Unterdruckpressen abspielen, stellen im wesentlichen die Umkehrung des Oberdruckpressens dar. Preßkurve und Kornverdichtung haben den gleichen, seiten-

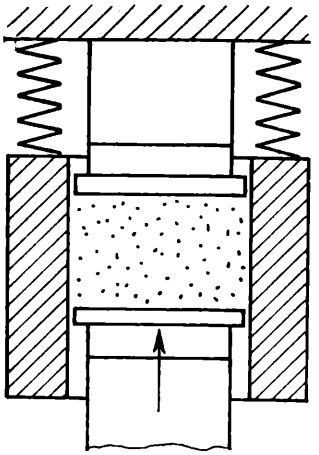


Bild 3.59. Durch Spiralfedern abgefederte Form für einseitige Unterdruckverpressung

verkehrten Verlauf. Das Anheben der Form und das damit verbundene Überfahren des Oberstempels durch den Formenkasten hat günstige Auswirkungen auf die Verdichtung der oberen Randzonen. Die Anwendung des Unterdruckprinzips kann den Pressenbau maßgeblich vereinfachen.

3.3.3.5. Matrizenabzugsverfahren

Um den Nachteil der verzögerten Mitnahme der Form auszuschließen, hat man den beweglichen Preßstempel mit einer *Formenabsenkvorrichtung* bzw. Matrizenabziehvorrichtung so gekoppelt, daß z. B. ein Geschwindigkeitsunterschied von $\frac{v_{\text{Form}}}{v_{\text{Stempel}}} = 1/2$ realisiert wurde, s. Bild 3.60 für beweglichen Oberstempel. Man versprach sich davon ein gleichmäßiges Eindringen von Unter- und Oberstempel und damit einen Ersatz für das Zweiseitenpressen. Ein Anwendungsbeispiel für das Matrizenabzugsverfahren wird in Abschnitt 4.3.3.2. vorgestellt. Wie die Untersuchungen von *Welter* [172] zeigten, ist aber auch diese Form der Verpressung eine einseitige, in der Regel eine Unterdruckpressung, wenngleich diese Methode eine bessere Randzonenverdichtung bewirkt als die vorhergenannten. Bei besonders flachen Steinen oder Hohlsteinen kann sich die zusätzliche Randzonenverdichtung bis in das Innere übertragen und die Festigkeit des Erzeugnisses somit insgesamt verbes-

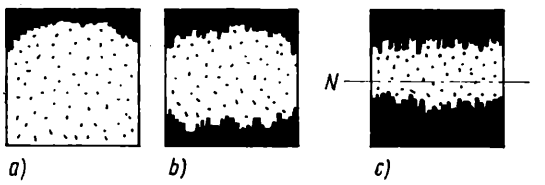


Bild 3.61. Erzeugnisse bei unterschiedlicher Verdichtungsart (*N* Preßneutrale)

a) Preßling bei einseitiger Oberdruckverpressung (nach Bild 3.53)
b) Preßling bei Formenabziehvorrichtung (nach Bild 3.60)
c) Preßling bei doppelseitigem Druck (nach Bild 3.63)

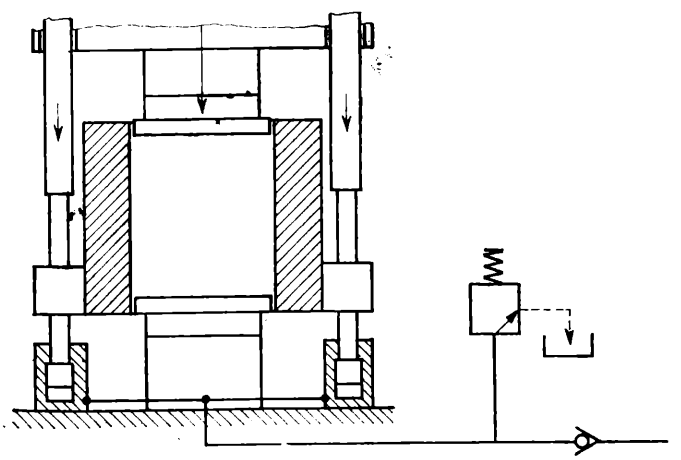


Bild 3.60. Kopplung von beweglichem Stempel und Formenabsenkvorrichtung

sert werden. Der Effekt wird stark vom Höhe/Durchmesser-Verhältnis des Erzeugnisses beeinflußt. Bild 3.61 zeigt die Verdichtung

a) für Oberdruckverpressung mit festem Mantel,
b) nach dem Matrizenabzugsverfahren bei $\frac{v_{\text{Form}}}{v_{\text{Stempel}}} \approx 1/2$ und
c) für doppelseitigen Druck.

3.3.3.6. Pressen mit doppelseitigem oder zweiseitigem Druck

Die zweiseitige Verpressung nach dem Doppeldrucksystem stellt bekanntlich die vorteilhafteste, einaxiale Preßmethode dar. Die gleichmäßig einwirkende Verdichtung von zwei Seiten ist die Voraussetzung für eine hohe Kantenfestigkeit und durchweg gute Erzeugniseigenschaften. Das Prinzip des Zweiseitendruckes bei feststehender Form zeigt Bild 3.62.

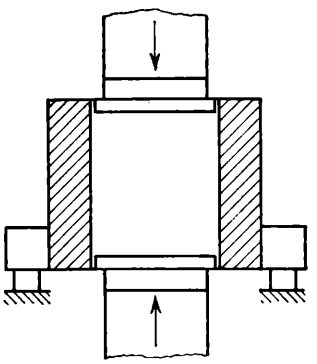


Bild 3.62. Prinzip des Zweiseitendrucks bei feststehender Form

Aus dem Verlauf der Preßkurve nach Bild 3.63 ist ersichtlich, mit welchem Kraft/Weg-Verhalten die gegenüberliegenden Flächen aufeinanderzu geschoben werden. Von beiden Seiten erfolgt ein gleichmäßiges Vorverdichten bei geringem Druck, wobei die Wege der oberen und unteren Körner gleich sind. Entsprechend ergibt sich eine Druckübertragung, die in der Mitte des Preßlings zur Ausbildung der neutralen Zone führt.
Durch die Anordnung von Federn oder durch eine hydraulische Abstützung der Form können die Stempelgeschwindigkeiten beeinflußt und der Preßvorgang für den gegebenen Anwendungsfall modifiziert werden. Diese Maßnahmen haben auch einen Einfluß auf die Lage der Preßneutralen.

3.3.3.7. Zweiseitendruck als Nacheinanderdruck

Zweiseitendruck als Nacheinanderdruck heißt, daß erst die eine der gegenüberliegenden Flächen verschoben wird. Nach Stillstand dieser wird die zweite gegen die nun ruhende Fläche gefahren.
Die preßtechnische Gestaltung dieses Vorganges zeigt Bild 3.64. Der Beginn der Pressung von oben entspricht einer einseitigen Verpressung. Die größten Wege legen die Körner zurück, die an dem Stempel anliegen, der sich zuerst absenkt. Mit dem Einsetzen des Unterstempeldruckes erfolgt eine Umkehrung der Kornbewe-

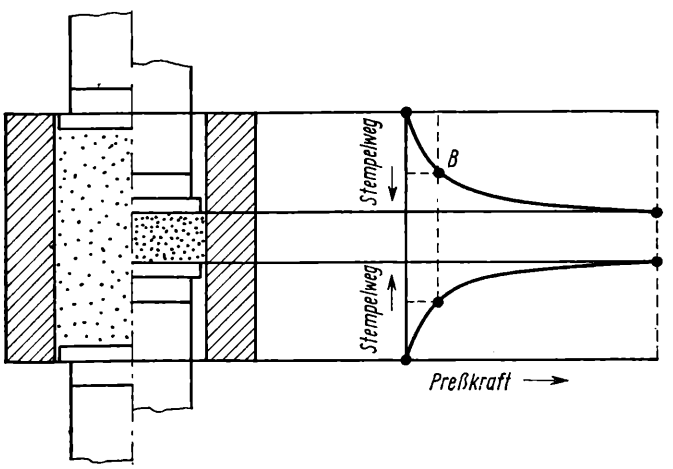


Bild 3.63. Preßkurve für Zweiseitendruck und feststehende Form [172]

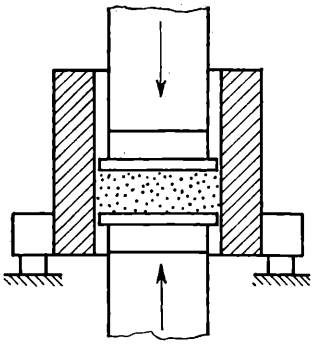


Bild 3.64. Zweiseitendruck als Nacheinanderdruck

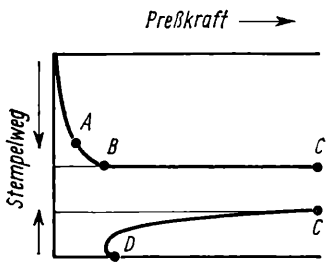


Bild 3.65. Verdichtungskurve für Zweiseitendruck als Nacheinanderdruck [172]

gung. Die Verdichtungskurve nach Bild 3.65 verdeutlicht dieses Verhalten. Der Punkt *A* zeigt den Entlüftungspunkt an. Bei *B* wird der Enddruck der ersten Preßperiode erreicht, der, wie deutlich ersichtlich, wesentlich geringer als der Enddruck der zweiten Preßperiode im Punkt *C* ist. Die Kraftdifferenz zwischen Punkt *D* und *B* resultiert aus Reibungsverlusten des Unterstempels.

Aus diesem Bewegungsablauf resultiert ein wesentlicher Mangel gegenüber dem gleichzeitigen Zweiseitenpressen. Der höhere Preßdruck der zweiten Verdichtungsphase führt zu einer stärkeren Verdichtung der diesem Preßstempel zugewandten Seite. Es ergibt sich ein Preßling mit über den Querschnitt unterschiedlichen Eigenschaften, die besonders gravierend dann in Erscheinung treten, wenn der Enddruck so hoch ist, daß eine Kornzerkleinerung eintritt. Das Doppeldruckverpressen als Nacheinanderdruck ist somit eine einseitige Verpressung in zwei Perioden, bei dem die Preßneutrale nicht in der Mitte zu liegen kommt.

Die genannte Problematik ist von untergeordneter Bedeutung, wenn es sich um Erzeugnisse mit sehr geringer Höhe gegenüber den sonstigen Abmessungen handelt, so daß Dichteunterschiede ohnehin kaum auftreten. Es kann somit für die Konstruktion von Fliesenpressen durchaus Vorteile bringen, mit Zweiseitendruck als Nacheinanderdruck zu arbeiten, wie es z. B. bei den Fliesenpressen vom Typ PY, s. Abschnitt 4.3.4.2., der Fall ist.

3.3.4. Technologische Einrichtungen zum Trockenpressen

Die Voraussetzung für ein erfolgreiches Trockenpressen ist die Herstellung eines homogenen, rieselfähigen Pulvers.

Um den Verdichtungsweg beim Pressen und den Einschluß von Luft möglichst gering zu halten, ist es günstig, wenn die Preßmasse bereits im Stadium der Aufbereitung weitgehend vorverdichtet wird. Zur Herstellung solcher Vorprodukte dienen Granulier- und Brikettierverfahren mit anschließender Zerkleinerung (sie wurden in Abschnitt 3.2.5.3. für bildsame Massen behandelt) sowie die Sprühkornaufbereitung (s. Abschnitt 3.3.2.4.).

Im Gegensatz zum Naßpressen erfolgt das Trokkenpressen auf Formgebungsmaschinen, mit denen hohe Preßdrücke erzielt werden können. Die Kraftübertragung erfolgt in der Regel hydraulisch, mechanisch oder in Kombination derselben.

Bei *hydraulischen* Pressen wird der Preßdruck über eine Hydraulikeinrichtung mit Öl oder auch mit Wasser aufgebracht. Die Drucksteigerung erfolgt allmählich, d. h., daß diese Pressen weich und relativ langsam arbeiten. Derartige Pressen erreichen Preßkräfte bis zu 20 MN und eignen sich besonders für das Verpressen großformatiger Feuerfesterzeugnisse. Sie sind auch häufig in der Baumaterialienindustrie anzutreffen.

Die meisten rein hydraulisch arbeitenden Pressen sind so konstruiert, daß der Druck doppelseitig ausgeübt wird. Die Formen sind auswechselbar in einem Preßtisch eingelassen. Zum Füllen der Form und zum Abnehmen der gepreßten Rohlinge besitzen die modernen Pressen automatische Vorrichtungen. Das Auswerfen

des Preßlings erfolgt durch den Unterstempel, sobald der Oberstempel nach oben gefahren wurde.
Die auf hydraulischen Pressen hergestellten Erzeugnisse sind durch den in der Regel angewendeten doppelseitigen Druck gut durchgepreßt und meist rißfrei. Ein weiterer Vorteil hydraulisch gepreßter Erzeugnisse ist ihre gute Maßhaltigkeit.
Bei den *mechanischen* Pressen erfolgt der Preßvorgang mit deutlich kürzerer Druckspitze. In der Regel laufen sie schneller als hydraulische Pressen und gestatten eine höhere Stückzahl. Nach der Form der Kraftübertragung kann man

- Exzenterpressen,
- Kurvenpressen,
- Kniehebelpressen und
- Spindelpressen

unterscheiden; nach der Art der Anordnung der Formen z. B. Drehtischpressen oder Revolverpressen.
Mechanische Pressen haben eine große Anwendungsbreite, die von der Herstellung tablettenförmiger, sehr kleiner Formkörper bis zur Formgebung von Feuerfestmaterialien und keramischen Baustoffen reicht.
Mit dem Ziel, die Vorzüge der hydraulischen Kraftübertragung mit der hohen Taktfolge mechanischer Pressen zu verbinden, entstanden *kombinierte Systeme*, wie die hydraulischen Kniehebelpressen und die hydraulischen Spindelpressen.
Auf spezielle verfahrenstechnische und konstruktive Lösungen von Trockenpressen wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

3.3.5. Isostatisches Pressen

3.3.5.1. Arbeitsprinzip des isostatischen Pressens

Seit der ersten Patentanmeldung im Jahre 1913 [173] hat das isostatische Pressen insbesondere in den letzten 30 Jahren eine rasante Entwicklung erfahren, die zu einer großen Anwendungsbreite vor allem in der technischen Keramik, aber auch in der Feinkeramik und Feuerfestkeramik geführt hat.
Das Prinzip des isostatischen Pressens beruht auf einem von *Pascal* im 17. Jahrhundert definierten Gesetz, wonach sich ein auf eine ruhende Flüssigkeit oder auf ein ruhendes Gas einwirkender Druck nach allen Richtungen gleichmäßig ausbreitet, so daß eine zur Oberfläche direkt proportionale Kraft entsteht (s. Bild 3.66) [174].
Zur Ausübung des Verfahrens füllt man eine elastomere Form – in der Regel eine Gummiform – mit Pulver, dichtet sie ab, um sie anschließend in einem mit Flüssigkeit gefüllten Behälter unter Druck zu setzen. Da die Form allseitig von der Preßflüssigkeit umgeben ist, erfolgt die Verdichtung »isostatisch«, also von allen Seiten gleichmäßig. Nach Abschluß des Preßvorganges wird der Behälter geöffnet und der Formling der Form entnommen.

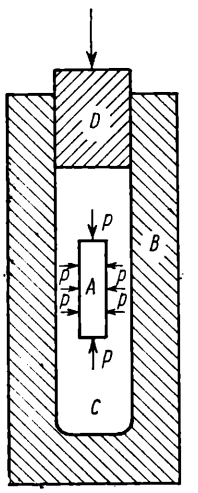


Bild 3.66. Prinzip der Druckverteilung beim isostatischen Pressen
A Preßwerkzeug, B Druckbehälter, C Preßflüssigkeit, D Preßstempel

Von diesem Grundprinzip wurden eine Vielzahl modifizierter Lösungen abgeleitet, auf die in Abschnitt 3.3.5.3. näher eingegangen wird.

3.3.5.2. Gesetzmäßigkeiten der isostatischen Verdichtung

Ein grundlegender Unterschied zwischen dem isostatischen Pressen und dem Stempelpressen besteht vor allem darin, daß es infolge der von allen Seiten gleichzeitig einwirkenden Verdichtungskräfte und -bewegungen zu einer insgesamt geringeren linearen Verschiebung der Masse kommt. Die Folge davon ist eine geringere Reibungsarbeit und eine gleichmäßigere Packungs-

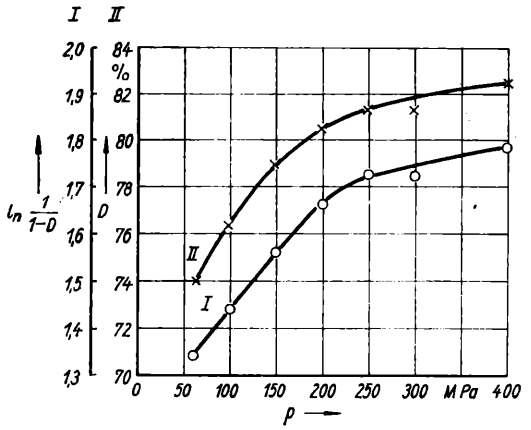


Bild 3.67. Einfluß des Preßdruckes auf die Rohdichte für eine hochplastische Quarzporzellanmasse [169]

dichte. Die Höhe des isostatischen Druckes ist die maßgebliche Größe, die die Eigenschaften des Preßlings, z. B. seine Rohdichte und Festigkeit, bestimmt.

Den Einfluß des Preßdruckes auf die Rohdichte zeigen die in Bild 3.67 [169] dargestellten Werte für ein Quarzporzellan. Aus dem Verlauf der Kurven ist zu erkennen, daß bei niedrigen Preßdrücken zunächst eine sehr große Verdichtung erfolgt, die dann mit zunehmender Kompression immer kleiner wird. Mathematisch läßt sich diese Abhängigkeit mit Hilfe der *Heckelschen Gleichung* (Gl. (3.25)) [175] beschreiben.

Ausgehend von der Gleichung

$$\varkappa = -\frac{1}{V}\left(\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}p}\right) \tag{3.21}$$

folgt für die Volumenänderung beim Pressen

$$\int_0^p \varkappa \,\mathrm{d}p = -\int_{V_0}^{V} \frac{\mathrm{d}V}{V}. \tag{3.22}$$

Unter Zuhilfenahme der Porosität P ergibt sich mit

$$P = \frac{V_{\text{fest}}}{V_{\text{ges}}} \qquad \text{und} \tag{3.23}$$

$$P = 1 - D \tag{3.24}$$

die *Heckelsche* Gleichung

$$\ln \frac{1}{1-D} = \varkappa p + a \tag{3.25}$$

V Volumen
D relative Dichte
$\varkappa$ materialabhängige Größe (in MPa^{-1})
p isostatischer Druck (in MPa)
a Konstante.

Tabelle 3.7. Verdichtungsparameter

Druck in MPa	$\varkappa$ in MPa^{-1}	a
60...210	$2{,}40 \cdot 10^{-3}$	1,200
210...>400	$0{,}44 \cdot 10^{-3}$	1,563

In Bild 3.67 sind zwei Bereiche erkennbar, für die sich die in Tabelle 3.7 [169] angngebenen Werte für $\varkappa$ und a errechnen.

Für die Handhabung und Bearbeitung isostatisch gepreßter Körper ist die Rohbruchfestigkeit eine besonders wichtige Größe. Den entscheidenden Einfluß auf die Festigkeit des Preßlings hat der Preßdruck. Durch ihn werden nicht nur schlechthin die Gesamtporosität, sondern auch die Porengeometrie, die Porenverteilung und damit die formschlüssigen Bindungen beeinflußt. Die Abhängigkeit der Rohbruchfestigkeit von der relativen Dichte des Preßlings ist in Bild 3.68 dargestellt [176]. Hier zeigt sich, daß mit zunehmender Verdichtung die Rohbruchfestigkeit zunächst allmählich und dann im Bereich von 60 bis 70 % der relativen Dichte stark ansteigt.

Ein spezifisches Phänomen des isostatischen Pressens ist die *elastische Rückdehnung* des Preßlings nach der Formgebung. Sie resultiert aus der beim Pressen gespeicherten elastischen Energie, die in der Dekompressionsphase und danach wieder freigesetzt wird. Ein Preßling wird deshalb nach Wegnahme des Druckes auf eine Größe entspannt, die etwas über der bei voller Druckbelastung liegt. Zwischen der elastomeren Form und dem Körper kommt es zu Scherspannungen, die zum Ablösen des Körpers von der Form führen und das anschließende Entformen deutlich erleichtern. Für die Herstellung von Hohlkörpern, aus denen nach dem Pressen ein Stahlkern entfernt werden muß, z. B. Rohre, ist

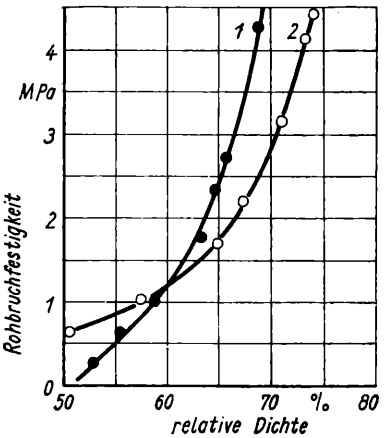


Bild 3.68. Zusammenhang zwischen der relativen Dichte und der Rohbruchfestigkeit [176]

1 Tonerdeporzellanmasse
2 Quarzporzellanmasse

dieser Rücksprungeffekt eine wichtige Voraussetzung.

Die elastische Rückdehnung ist mit der Dekompression noch keineswegs abgeschlossen. Formlinge mit einem hohen Anteil an bildsamen Rohstoffen zeigen eine ausgeprägte elastische Rückdehnung, die noch bis zu 48 Stunden nach der Entformung nachgewiesen werden kann.

Das Ausmaß der elastischen Rückdehnung ist im wesentlichen von den Eigenschaften der Preßmasse und vom Preßdruck abhängig. Für Porzellanmassen ergibt sich eine Zunahme der elastischen Rückdehnung mit

- steigender Korngröße des Preßgranulates und
- abnehmender Granulatfeuchte (Bereich $<1{,}5\,\%$).

Die physikalische Ursache für diese Abhängigkeit muß insbesondere in der Elastizität und Biegsamkeit der Tonmineralien gesehen werden, die die Fähigkeit besitzen, sich bei Einwirkung von Druck an die körnigen Materialien, wie Feldspat und Quarz, anzuschmiegen (s. auch Abschnitt 2.3.3.). Aus dieser Sicht sind auch die von *Melzer* [177] gefundenen Abhängigkeiten der elastischen Rückdehnung vom Preßdruck zu interpretieren. Für Porzellanmassen ergibt sich nach Bild 3.69 [177] ein Maximum der elastischen Rückdehnung bei etwa 20 MPa Preßdruck.

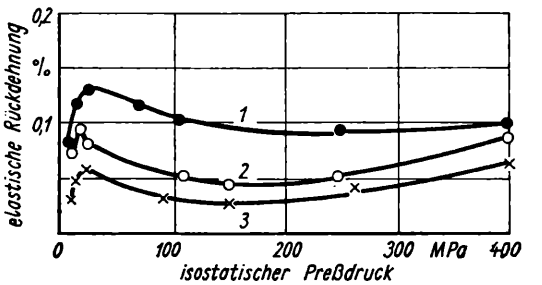


Bild 3.69. Elastische Rückdehnung in Abhängigkeit vom isostatischen Preßdruck [177]

1, 2, 3 verschiedene Porzellanmassen

Eine weitere Besonderheit des isostatischen Pressens ist die Tatsache, daß eingeschlossene Luft beim Pressen nicht entweichen kann bzw. gar nicht erst das Bestreben dazu hat, weil innerhalb und außerhalb des Mediums dieselben Drücke herrschen. Die Luft wird im Gegensatz zum Stempelpressen mit verdichtet und beeinflußt das Druck/Volumen-Verhältnis des Pulvers. Entsprechend dem Gasgesetz (Gl. (3.26)), gilt bei konstanter Temperatur

$$p_0 V_0 = p_1 V_1 \tag{3.26}$$

p_0 Atmosphärendruck
p_1 Luftdruck in den Poren bei gegebenem Preßdruck
V_0 Luftporenvolumen im Füllzustand
V_1 Luftporenvolumen bei gegebenem Preßdruck.

Durch Einbeziehung der Dichte ergeben sich für die Luftporenvolumina:

$$V_0 = \left(\frac{1}{\varrho_S} - \frac{1}{\varrho_R}\right) m \qquad \text{und} \tag{3.27}$$

$$V_1 = \left(\frac{1}{\varrho_F} - \frac{1}{\varrho_R}\right) m \tag{3.28}$$

ϱ_S Schüttdichte der Masse m
ϱ_R Reindichte der Masse m
ϱ_F Rohdichte des Formlings.

Problematisch ist der Abbau des erhöhten Luftdruckes in den Poren während der Dekompression. Wenn nämlich der in den Poren wirksame Luftdruck die Gefügefestigkeit des Preßlings übersteigt, kommt es im Zuge der Druckentlastung zur Rißbildung und Zerstörung des Formlings. Es muß deshalb eine definierte Druckabbaugeschwindigkeit bzw. eine kritische Entlastungszeit [178] eingehalten werden. In Abhängigkeit vom herzustellenden Erzeugnis kann

diese Zeit wenige Sekunden bis mehr als eine Minute betragen. Im allgemeinen nimmt die kritische Entlastungszeit mit der Größe der Formlinge und dem isostatischen Druck zu.
Im Interesse der Produktivität ist man deshalb bemüht, von vornherein den wirksamen Porenluftdruck so klein wie möglich zu halten, was erreicht werden kann durch

- Realisierung einer hohen Schütt- oder Rütteldichte beim Füllen der Form,
- Verarbeitung von Massen mit geringer Feuchtigkeit (s. Abschnitt 3.3.2.4.) und
- Evakuieren der gefüllten Form,

wobei die letztere Maßnahme nur bei großen Formkörpern praktiziert wird, weil für die Evakuierung ebenfalls Zeit benötigt wird und der technische Aufwand erheblich zunimmt.

3.3.5.3. Verfahrenstechnische Gestaltung isostatischer Preßeinrichtungen

Auf der Basis des in Abschnitt 3.3.5.1. dargelegten Prinzips des isostatischen Pressens wurde im Verlaufe der Verfahrensentwicklung eine Vielzahl technischer Lösungen realisiert, die man nach drei Gesichtspunkten untergliedern kann:

- der Temperatur,
- dem Verfahren (Arbeitsweise der elastomeren Form) und
- der Druckeinwirkung.

Bild 3.70 zeigt die wesentlichsten technischen Lösungen in Form einer Übersichtsgrafik [169].
In der Keramik ist das Kaltpressen die dominierende Technik. Dennoch sind das Warm- und das Heißpressen für die Keramik nicht minder von Bedeutung, weil mit diesen Verfahren vor allem spezielle Keramiken für technische Anwendungen hergestellt werden können. Auf die Probleme der Heißisostatik soll deshalb in Abschnitt 3.3.6. gesondert eingegangen werden.
Nach der verfahrenstechnischen Gestaltung der Preßeinrichtung werden unterschieden:

- das Naßmatrizenverfahren (Pressen mit freier Matrize),
- das Trockenmatrizenverfahren (Pressen mit fixer Matrize),
- das quasiisostatische Pressen (*Vinamold*-Verfahren).

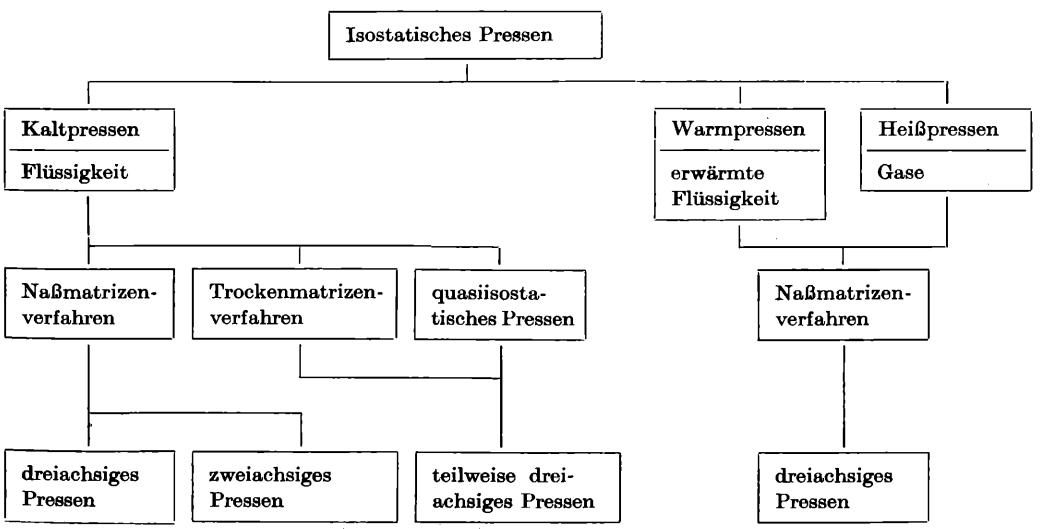


Bild 3.70. Gliederung der isostatischen Preßtechnik [169]

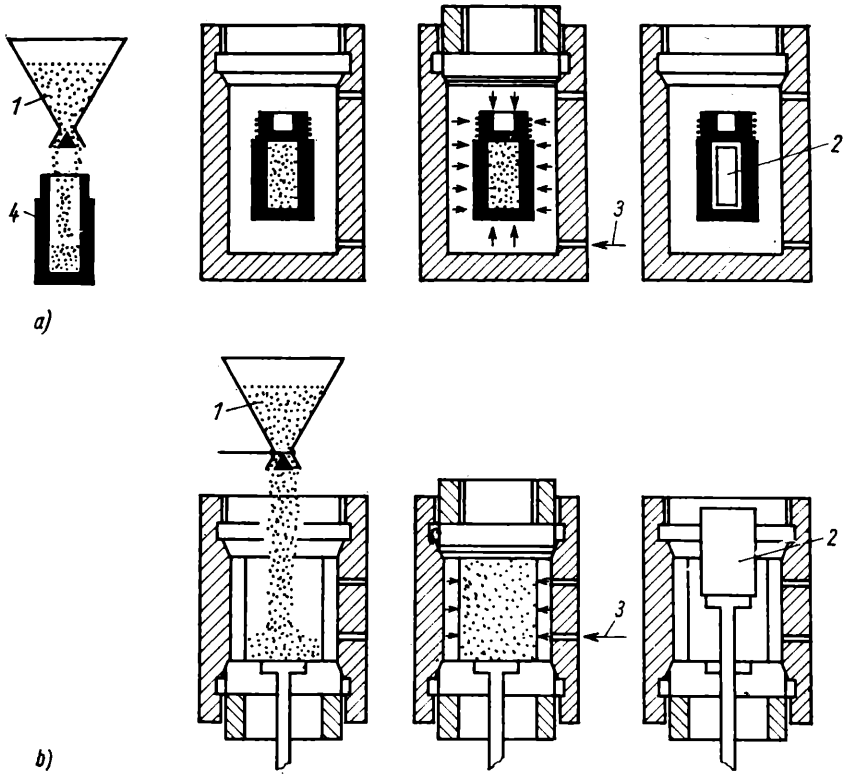


Bild 3.71. Arbeitsweise von Naß- und Trockenmatrizenverfahren [179]

a) Naßmatrize

b) Trockenmatrize

1 Pulver, *2* Preßling, *3* Preßflüssigkeit, *4* Matrize

Das Charakteristische des *Naßmatrizenverfahrens* ist das Arbeiten mit freier Matrize. Das Prinzip verdeutlicht Bild 3.71 a [179]. Die elastomere Form wird außerhalb des Rezipienten gefüllt und dicht verschlossen. Nach dem Einbringen der Form werden der Druckbehälter ebenfalls verschlossen und die Verdichtung eingeleitet. Der isostatische Druck wirkt allseitig über die Form auf die zu verdichtende Masse ein. Das Naßmatrizenverfahren ist für die Erzeugung hoher Drücke und damit für die Herstellung großer Erzeugnisse besonders geeignet. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist die hohe Disponibilität, die die Anwendung der unterschiedlichsten Formen ermöglicht. Im Naßmatrizenverfahren werden Hubel für das Kopierdrehen von Langstabisolatoren, Steinzeugrohre, feuerfeste Spezialerzeugnisse, wie Glasspeisermaterialien, Verschluß- und Ausgußmaterialien für Stahlwerkspfannen, Formsteine aus Cr_2O_3, ZrO_2, Al_2O_3 u. a. hergestellt.

Bei der Formgebung von Großteilen, z. B. von Hubeln für Langstabisolatoren, beträgt die Taktzeit mehrere Minuten.

Das *Trockenmatrizenverfahren* arbeitet mit einer flexiblen Form, die innerhalb des Hochdruckgefäßes, meist an der Einfüllöffnung, fest eingespannt ist. Zum Füllen der Formen und zum Herausnehmen der Preßlinge dienen spezielle Vorrichtungen. Bild 3.71 b [179] zeigt eine Möglichkeit für das Füllen der Form und das Auswerfen des Preßlings. Da bei diesem Verfahren nicht ohne weiteres eine Form gegen eine andere ausgewechselt werden kann, wird es vornehmlich für die Serienproduktion völlig gleicher Teile eingesetzt. Das Trockenmatrizenverfahren

ist deshalb für die automatisierte Produktion von Kleinteilen, z. B. Grundkörper für Zündkerzen oder Schmelzsicherungen, eine unentbehrliche Technik geworden. Die mit diesen Anlagen erzielten Taktzeiten liegen zum Teil schon bei wenigen Sekunden, bei Zündkerzenisolierkörpern etwa 10 bis 12 s. Die Druckverteilung ist aufgrund der Befestigung der Form am Rezipienten nicht rein isostatisch, sondern semiisostatisch. Bei der Herstellung von Kleinteilen hat dieser Kompromiß aber keinen wesentlichen Einfluß auf die Qualität der Erzeugnisse.

Mit dem Ziel einer Verbesserung der Oberflächenqualität kann man das Trockenmatrizenverfahren so gestalten, daß gegen eine Metallfläche gepreßt wird (s. Bild 3.73).

Das *quasiisostatische Preßverfahren* [180, 181] wurde in der französischen Literatur als *Vinamold-Verfahren* bekanntgemacht. Das Prinzip des Verfahrens beruht darauf, daß sich bestimmte Kunststoffe bei hohen Drücken wie eine Flüssigkeit mit hoher Viskosität verhalten und bei Wegnahme des Druckes wieder die charakteristischen Eigenschaften eines Festkörpers erhalten. Durch diese Gel/Sol-Transformation kann der Kunststoff nacheinander die Funktionen der elastomeren Form und der Hydraulikflüssigkeit übernehmen. Die Herstellung der Form erfolgt durch Gießen der bei 140 bis 150 °C flüssigen Masse. Fehlerhafte und verschlissene Formen können über den Weg des Erhitzens wieder zu neuen Formen verarbeitet werden. Der Vorteil des *Vinamold*-Verfahrens besteht darin, daß mit derartigen Formen einfache Preßmatrizen bestückt werden können.

Abgeleitet von den genannten drei Grundprinzipien, gibt es bereits viele Übergänge, die nicht immer eine eindeutige Zuordnung gestatten.

Nach der Druckeinwirkung wird zwischen dem *dreiachsigen* und *zweiachsigen Pressen* unterschieden. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden liegt in der Preßform begründet. Das dreiachsige Pressen geht aus Bild 3.71a hervor. Ein Beispiel für das zweiachsige Pressen zeigt Bild 3.72 [169]. Die Herstellung von Hohlhubeln erfolgt in Analogie zum Vollhubelpressen, nur mit dem Unterschied, daß beim zweiachsigen Pressen der Preßdruck nur in radialer und tangentialer Richtung wirkt. Solche zweiachsig gepreßten Erzeugnisse haben eine größere Durchmesserschwindung als dreiachsig gepreßte.

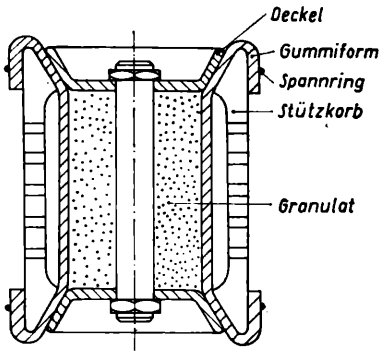


Bild 3.72. Zweiachsiges Pressen von Hohlhubeln [169]

3.3.5.4. Technologische Einrichtungen des isostatischen Pressens

Zu den wichtigsten Baugruppen einer isostatischen Presse mit *freier Matrize* gehören:

- Druckerzeugungsanlage mit dem eigentlichen Druckerzeuger,
- Hochdruckgefäß mit Abschlußdeckel bzw. Verschlußeinrichtung,
- Dekompressionselemente,
- Speicher für das Druckmedium,
- Arbeitsmittel zur Herstellung des Preßlings,
- Steuer- und Überwachungseinrichtung sowie
- periphere Vorrichtungen (Hebezeuge, Dosiervorrichtungen, Entlüftungseinrichtungen u. a.).

Für den Aufbau des erforderlichen Preßdruckes sorgen eine großvolumige Füll- und Absaugpumpe sowie mehrere Hochdruckpumpen. Bei Produktionsanlagen, die mit Preßdrücken bis zu 200 MPa arbeiten, werden elektrische Motorpumpen eingesetzt. Betragen die Preßdrücke 1000 MPa und mehr, dann werden Druckübersetzer benötigt. Von der Industrie werden Pressenkonstruktionen für Preßkräfte bis 600 MN und Hochdruck-Rezipienten für Betriebsdrücke bis 3000 MPa angeboten [182, 183]. Aus diesen hohen Drücken resultieren entsprechende Sicherheitsmaßnahmen.

Jede Anlage ist mit mindestens zwei Überdrucksicherungen auszulegen. Die Druckanlage wird in einer Grube oder in einem separaten Raum

untergebracht. Nur bei kleineren Druckerzeugeranlagen genügt die Unterbringung in einem Stahlschrank.

Nach der Art des Hochdruckgefäßes oder besser nach der Verschlußeinrichtung werden im wesentlichen zwei Grundprinzipien von Pressen unterschieden [169]:

- der Rezipient ist entweder von einem Rahmen bzw. Joch umgeben (Quintusprinzip), oder
- der Rezipient wird durch einen Bajonettverschluß verschlossen, der im Deckel eingearbeitet ist.

Das Quintusprinzip wird konsequent von der Firma ASEA in Schweden verwirklicht, während z. B. National Forge Europe in Belgien freistehende Rezipienten mit Bajonettverschluß liefert. Unabhängig von der Bauart, erwartet man von einem Rezipienten, daß er etwa 1 Mill. Pressungen ermöglicht. Für das betriebssichere und schnelle Öffnen und Schließen des Hochdruckgefäßes sind Hebezeuge erforderlich. Nach *Papen* [174] gibt es verschiedene Ausführungen:

- Auslegerhebezeug für kleinere Anlagen und Laborpressen,
- horizontal gefahrenes Hebezeug und
- vertikal gefahrenes Hebezeug.

Bevor der Deckel verschlossen wird, muß die eingeschlossene Luft aus dem Rezipienten entfernt werden. Die eigentliche Verschließvorrichtung wird manuell oder automatisch bedient. In der Regel kann der Verschluß in zweieinhalb Umdrehungen von Hand leicht geschlossen werden [184].

Ihre Gestalt erhalten die Preßlinge durch die freie Matrize. Als Formenwerkstoffe werden Naturgummi, Silicongummi, PVC-Materialien und Polyurethane verwendet. Das Füllen der freien Matrize erfolgt nach Masse oder Volumen mit bekannten Dosiereinrichtungen. In einigen Fällen wird die Masse vor dem Pressen durch Vibration vorverdichtet. Das hat den Vorteil, daß das eingeschlossene Luftvolumen und die Kompressionsarbeit verringert werden. Des weiteren erhöht sich die Kontur- und Formgenauigkeit der gepreßten Erzeugnisse.

Für das Verschließen der hochelastischen Form sind Hilfsmittel, wie Schlauchschellen oder Gummibänder, erforderlich. Bereits bei der Matrizenherstellung ist darauf zu achten, daß die Abdichtung der Formen die gleichmäßige Verdichtung aus allen Richtungen nicht stört. Insbesondere müssen folgende Faktoren berücksichtigt werden [184]:

- Die hohe Elastizität der Form ermöglicht es ihr, bereits bei Drücken von 1 MPa mit einer elastischen Verformung zu reagieren. Eine Abdichtung, z. B. eine Schelle, kann diesen Vorgang in einer Richtung stören, und die Folge davon sind Abweichungen von der gewünschten Preßlingsgestalt.
- Bei hohen Drücken besteht die Gefahr, daß es zu Umklammerungen zwischen Form und Preßling kommt und beim Expandieren Rißbildung auftritt.
- Die Innenseite der Matrize sollte möglichst keine scharfen Ecken aufweisen.
- Die Matrize muß eine entsprechende Porosität besitzen, die ihr die Abgabe der Luft beim Dekomprimieren ermöglicht. Anderenfalls ist die Matrize vor dem Pressen zu evakuieren. In jedem Falle muß evakuiert werden, wenn die eingeschlossene Luft die Sinterung des Pulvers behindert.

Der Dekompressionskreislauf ist mit mehreren Ventilen ausgerüstet, die unterschiedliche Dekompressionsgeschwindigkeiten und damit eine Anpassung an den Pulvertyp und das herzustellende Erzeugnis ermöglichen. Die Ablaßgeschwindigkeit der Dekompressionseinrichtung muß auf

- das Freisetzen der Luft in den Poren des Preßlings,
- den Abbau von Spannungen in der Gummiform und
- teilweise auch auf das Freikommen von Eigenspannungen im Preßling

eingestellt werden.

Für eine sichere Produktion sind zuverlässige Kontrollinstrumente besonders wichtig, die eine automatische Steuerung ermöglichen und den Einsatz einer Bedienungsperson in unmittelbarer Nähe der Presse erübrigen.

Isostatische Pressen, die nach dem *Trockenmatrizenverfahren* arbeiten, besitzen im allgemeinen die gleichen Baugruppen wie beim Naßmatrizenverfahren. Da das Trockenmatrizenverfahren vorwiegend für die Herstellung kleiner

Erzeugnisse mit geometrisch einfacher Form angewendet wird, sind die Druckgefäße kleiner. Oftmals wird auch mit mehreren Druckkammern gearbeitet. Die Vorrichtungen zum Einfüllen des Pulvers und für die Entnahme der Preßlinge werden an die Druckgefäße montiert. Vollautomatisch arbeitende Anlagen können mit dieser Anordnung mehr als 300 Stück je Stunde und Druckbehälter produzieren.

Bei der Herstellung von Rohren im isostatischen Preßverfahren (s. auch Bild 3.72) ist es notwendig, einen Stahlkern zu positionieren, der den Innendurchmesser des Rohres begrenzt. Der Außendurchmesser ergibt sich durch die eingesetzte Matrize. Stahlkern und Matrize werden vertikal angeordnet und das Rohr stehend verpreßt. Während des Einfüllens erfolgt eine Vorverdichtung des Materials durch Vibrieren. Nachdem der Druckbehälter mit der gefüllten Matrize unter den Preßrahmen gebracht wurde, schließt sich die Beaufschlagung mit Druck an. Im Anschluß an den Preßvorgang werden der Druckbehälter in die Ausgangsstellung gebracht und das Rohr mit dem Kern aus der Matrize gezogen. Das gepreßte Rohr kann dann unter Nutzung des in Abschnitt 3.3.5.2. erläuterten Rücksprungeffektes vom Kern abgestreift werden.

Richtungweisende Arbeiten zum isostatischen Pressen von Steinzeugrohren wurden von *Bloch* und anderen sowjetischen Forschern [185, 186] durchgeführt. Das Arbeitsprinzip isostatischer Steinzeugpressen ähnelt dem bei der Herstellung kleiner Rohre [187].

Eine große technische Bedeutung hat das isostatische Pressen von Flachgeschirr erlangt. Das Prinzip des Flachgeschirrpressens zeigt Bild 3.73 [218]. Ähnlich wie beim Pressen von Rohren und Hohlhubeln wird auch hier gegen eine Metall- oder Kunststoffläche gepreßt, die in diesem Falle durch den Oberstempel gegeben ist.

Beim Füllen des Preßwerkzeuges sind der Oberstempel (*1*) angehoben und die Membran (*4*) entspannt. Das Preßgranulat (3_1) wird lose eingefüllt. Anschließend werden der Oberstempel in Endstellung gebracht und die Membran gleichmäßig über die Preßflüssigkeit (*5*) mit Druck beaufschlagt. Die Entnahme des gepreßten Tellers erfolgt bei zurückgefahrenem Oberstempel.

Über die Erläuterung des Prinzips hinausgehende Ausführungen beinhalten die Maschinenbeschreibungen der Flachgeschirrpressen der

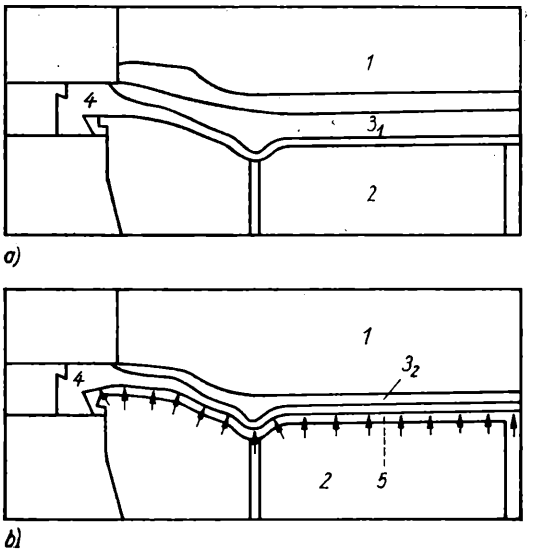


Bild 3.73. Isostatisches Flachgeschirrpressen [218]
a) Füllstellung, *b*) Preßstellung
1 Oberstempel, *2* Membranunterstützung, 3_1 Preßgranulat, 3_2 gepreßter Teller, *4* Membran, *5* Verdichtungsraum (Preßflüssigkeit)

Firmen Dorst in Abschnitt 4.3.6.2. und Netzsch in Abschnitt 4.3.6.3.

3.3.6. Heißpressen

Das Heißpressen ist ein Verfahren, bei dem Formgebung und Sinterung in einem Arbeitsgang ablaufen. Die Verdichtung kann durch *Stempelpressen* oder durch *isostatisches Pressen* bewirkt werden. Durch die gleichzeitige Einwirkung von Druck und Temperatur stellt das Heißpressen nicht nur schlechthin eine zusätzliche Möglichkeit der Formgebung dar. Es ist vielmehr ein Verfahren, nach dem Erzeugnisse mit qualitativ veränderten Eigenschaften hergestellt werden können. So ist es möglich, Preßlingsdichten zu erzielen, die nahezu an die theoretische Dichte herankommen. Nach diesem Verfahren werden Oxide, Nitride, Carbide, Graphit und Cermets hergestellt. Der Vorteil, den das Heißpressen mit sich bringt, besteht vor allem darin, daß die geforderte Dichte bei relativ geringen Temperaturen, also in der Phase geringer Kristallwachstumsgeschwindigkeit, erreicht wird. Für viele keramische Werkstoffe ist

die Kristallgröße ein entscheidender Parameter, von dem die mechanischen, elektrischen, magnetischen und chemischen Eigenschaften abhängen.
Beim *Stempelpressen* wird das Prinzip des doppelseitigen Pressens bevorzugt. In der Regel sind Graphitformen eingesetzt, die bei Anwesenheit von Schutzgas eine Temperatur bis zu 2000 °C und einen Preßdruck bis 50 MPa ermöglichen. Höhere Preßdrücke erzielt man mit Preßwerkzeugen aus Sonderstählen, Titancarbid oder Korund. Diese Materialien haben den Vorteil, daß sie bis zu ihrer möglichen Einsatztemperatur auch in oxydierender Atmosphäre Anwendung finden können. Der Druck wird, wie beim herkömmlichen Stempelpressen, vorwiegend hydraulisch aufgebracht. Die Beheizung kann über elektrische Heizleiter oder, was eleganter ist, über eine Induktionsheizung realisiert werden.
Das *heißisostatische Pressen* (HIP, Hot Isostatic Pressing) wird zum Verdichten oder Verbinden artgleicher oder unterschiedlicher Materialien eingesetzt. Es hat eine große Bedeutung erlangt für

- die Verfestigung von Metallpulvern,
- das Nachverdichten von Hartmetallen,
- die Herstellung von Metallverbindungen und
- die Verdichtung von Keramik.

Der Vorteil des heißisostatischen Pressens gegenüber Heißpressen zwischen zwei Stempeln besteht in der höheren Homogenität des Preßlings, die, wie bei der Kaltisostatik, aus den unterschiedlichen Reibungsverhältnissen und den kürzeren Wegen der Partikeln resultieren.
Das Prinzip des heißisostatischen Pressens zeigt Bild 3.74 [169]. Bei der Herstellung von Keramik kann entsprechend dem Formgebungsziel von einem Pulver oder von einem kalt vorverdichteten Körper ausgegangen werden. Das Material wird in eine Matrize aus Weicheisen-, Molybdän-, Nickel-, Niob- oder Tantalblech gegeben, die anschließend evakuiert und verschweißt wird. Neuere Entwicklungsrichtungen belegen, daß auch ein Glasüberzug über vorverdichtete Rohlinge als Matrize geeignet ist. Man nutzt für die Verpressung die Viskosität/Temperatur-Kurve des Glases aus. Die Druckübertragung erfolgt mit Hilfe eines Edelgases – meist Argon –, und die Temperatur wird über Heizleiter, z. B. eine Wolframwicklung, die in speziellen Heiz-

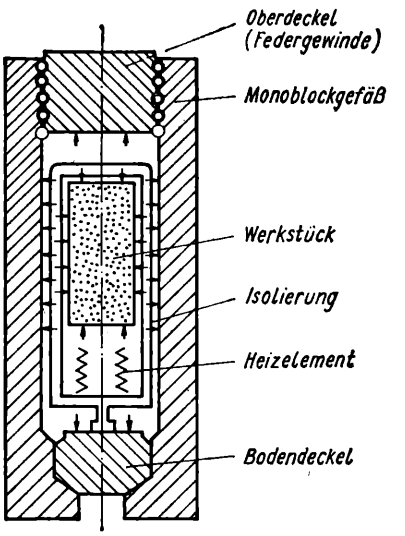


Bild 3.74. Prinzip des heißisostatischen Pressens [169]

ofeneinsätzen untergebracht ist, realisiert. Nach dieser Methode wird die theoretische Dichte von hochreinem Al_2O_3 bereits bei 1350 °C und 150 MPa nahezu erreicht. Für die Durchschlagfestigkeit, die Wärmeleitfähigkeit, die Härte und die Druckfestigkeit wurden günstigere Werte als bei konventionell hergestellten Al_2O_3-Körpern ermittelt [188].
Eine große Bedeutung hat der HIP-Prozeß durch die rasante Entwicklung von Hochtemperaturmaterialien, z. B. Siliciumcarbid, Siliciumnitrid, Aluminiumnitrid u. a., erfahren. Solche Bauteile, die unter anderem zunehmend Anwendung im Turbinen- und Motorenbau finden, werden z. T. bei Temperaturen zwischen 1750 und 2200 °C und Drücken bis zu 200 MPa »gehippt«. Die Verfahrensweise ist dabei ähnlich wie bei anderen Materialien. Das zu verdichtende Material wird mit einer glasähnlichen Hülle oder Kapsel versehen und bei niedrigem Druck bis in den Transformationsbereich des Hüllenmaterials erwärmt. Anschließend erfolgt die Beaufschlagung mit hohen Druck und Temperatur. Das Keramikteil wird in einem Arbeitsgang fertiggestellt.
Teile, die bereits gesintert sind und keine kohärenten Poren mehr aufweisen, können ohne Verwendung von Kapseln auf eine Dichte nahe des theoretischen Wertes »gehippt« werden.

3.4. Spezielle Formgebungsverfahren für Massen unterschiedlicher Konsistenz

3.4.1. Spanabhebende Formgebung

3.4.1.1. Allgemeines

Erzeugnisse, die im eigentlichen Formgebungsvorgang nicht vollständig herstellbar sind, können durch eine mechanische, materialabtragende Bearbeitung fertiggestellt werden. Zu diesen gehören Körper mit hintergriffigen Aussparungen, extrem dünne Scherben, die aus gepreßten oder stranggezogenen Vorformlingen hergestellt werden müssen, oder isostatisch gepreßte Teile, die nicht die geforderte Konturengenauigkeit erfüllen. So werden z. B. Zündkerzen durch Profilschleifen mittels hochporöser Edelkorundscheiben bzw. feinporöser Rubinkorundscheiben nachbearbeitet.

Als eine besondere Form der materialabtragenden Bearbeitung hat sich das spanabhebende *Abdrehen* oder *Kopierdrehen* rotationssymmetrischer Formlinge herausgebildet. Nach diesem Verfahren werden vor allem Langstabisolatoren, Durchführungen, Massivstützer, Vollkernisolatoren und andere, insbesondere für die energieorientierte Elektrotechnik wichtige Elemente mit hohem spezifischem elektrischem Widerstand hergestellt. Die Vielfalt der Isolatorentypen und der hohe Arbeitsaufwand ihrer Herstellung haben dazu geführt, daß man sich um eine Maschinenentwicklung bemühte, die den Anforderungen an eine hohe Disponibilität und eine hohe Produktivität entsprach. Isolatoren werden heute vollautomatisch auf modernen Kopierdrehautomaten produziert, die analog zum Drehen in der Metallbearbeitung die Formgebung spanabhebend mit Hilfe eines Bearbeitungswerkzeuges realisieren. Für das Kopierdrehen wird die keramische Masse in der Regel als Zylinder (Hubel) vorgeformt. Nach der Konsistenz und der Herstellung des Hubels werden drei Formen des Kopierdrehens unterschieden:

- Abdrehen im lederharten Zustand (Hubelfeuchte etwa 15 bis 18 %),
- Abdrehen weißgetrockneter oder isostatisch gepreßter Hubel (Hubelfeuchte <2 %),
- Abdrehen verglühter Vorformlinge (Glühtemperatur 800 bis 1000 °C).

Am verbreitetsten ist das Ziehen von Hubeln auf Vakuumstrangpressen und das Abdrehen im lederharten Zustand. Die Hubel werden in der Regel weichplastisch gezogen und durch elektrische Widerstandstrocknung auf 15 bis 18 % Feuchte vorgetrocknet. Eine steifplastische Formgebung der Hubel ist auch möglich.

Bedingt durch die Entwicklung wirksamer Entstaubungsanlagen für die Kopierdrehmaschinen sowie verschleißfester Abdrehmesser aus Hartmetall und Schneidkeramik, gehen viele Hersteller von Isolatoren aber auch dazu über, das Abdrehen im weißtrockenen Zustand mit <2 % Feuchte durchzuführen. Die Fortschritte auf dem Gebiet der isostatischen Preßtechnik und die damit mögliche Herstellung äußerst homogener Hubel kommt dem entgegen. Da bei dieser Methode Unterschiede in der Trockenschwindung nicht mehr auftreten können, sind solche Erzeugnisse besonders maßhaltig.

Das Abdrehen vorgeglühter Rohlinge wird nur in Ausnahmefällen durchgeführt, z. B., wenn für die Bearbeitung eine erhöhte Festigkeit des Rohlings erforderlich ist oder eine extrem hohe Maßhaltigkeit des Erzeugnisses gefordert wird. Der zusätzliche Glühbrand und der erhöhte Werkzeugverschleiß vergrößern in jedem Falle die Herstellungskosten.

3.4.1.2. Arbeitsprinzipien von Kopierdrehmaschinen

Die ältesten Kopiermaschinen, die nur noch vereinzelt in der Produktion anzutreffen sind, ähneln den Drehmaschinen in der Metallbearbeitung. Bei diesen Kopierdrehmaschinen ist auf einem Längssupport ein Quersupport aufgebaut, der das Drehwerkzeug trägt. Durch ein Hebelparallelogramm wird dieses an einer der Gestalt des Formlings entsprechenden Schablone entlangbewegt und überträgt deren Umrisse mit Hilfe des Abdrehwerkzeuges auf das Drehteil. Nach diesem Prinzip arbeitende Kopierdrehmaschinen wurden sowohl für den Betrieb von Hand als auch mit elektromagnetischer Steuerung gebaut.

Aus Gründen der Anschaulichkeit sollen die

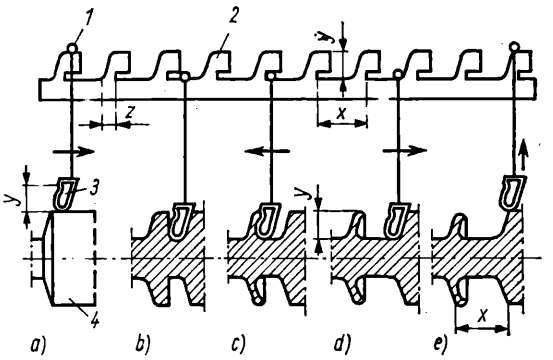


Bild 3.75. Arbeitsgänge beim Kopieren eines Schirmes von einem Langstabisolator [189]
Bewegungsrichtung des Supports:
a) beim Kopieren der Schirmoberseite
b) beim Einstechen in den Hubel und Kopieren der Schirmunterseite
c) beim Kopieren des Strunkes
d) bei der Formung der nächsten Schirmoberseite
e) siehe *a*)
1 Kopierfinger, *2* Leitschablone, *3* Formdrehstahl, *4* Hubel

unterschiedlichen Arbeitsgänge beim Kopierdrehen von Langstabisolatoren anhand einer mechanisch arbeitenden Steuerung mittels Leitschablone und Formdrehstahls näher erläutert werden (Bild 3.75) [189].

Die Kopiervorrichtung, die im einfachsten Fall über zwei Handräder vertikal und horizontal in beliebiger Richtung bewegt werden kann, muß zunächst in die Ausgangsstellung gefahren werden. Anschließend wird mit einem Kopierfinger (*1*), der über das Kopiergestänge mit dem Formdrehstahl (*3*) verbunden ist, die vorgegebene Schablone (*2*) abgetastet. Um die Tropfnase (Untergriffigkeit) an der Schirmunterseite realisieren zu können, ist bei der Anordnung nach Bild 3.75 der Formdrehstahl als profilierte Schlinge ausgebildet. Es ist andererseits aber auch möglich, bei der Schablonengestaltung die Untergriffigkeit zu berücksichtigen.

Die Stellung *a*) im Bild 3.75 zeigt, daß der Schirm an der Oberseite bereits kopiert ist. In der Stellung *b*) wird die Bearbeitung der Schirmunterseite in Angriff genommen. Dazu wird der Formdrehstahl zwischen den Schirmen eingestochen und mit verminderter Geschwindigkeit in den Hubel (*4*) hineingeführt. Diese Verringerung der Geschwindigkeit ist notwendig, um eine große Spandicke und die Ausbildung von Rissen infolge zu starker Beanspruchung auf Torsion zu vermeiden. Um die geforderte Schirmstärke zu erreichen, wird der Kopierfinger in die Stellung *c*) gefahren. In der Stellung *d*) ist der Schirm bereits kopiert, und die obere Seite des nächsten Schirmes wird in Angriff genommen. Mit dem Aufsetzen des Kopierfingers auf der Schablone, Stellung *e*), wird die Stellung *a*) wieder erreicht.

Diese in Bild 3.75 ausgewiesenen Arbeitsstellungen a) bis e) haben auch für das automatische Kopieren mit fotoelektrisch gesteuerter Abtastung oder NC-Steuerungssystemen ihre prinzipielle Gültigkeit behalten.

Bei den Maschinen mit fotoelektrisch gesteuerter Abtastung wurden die Blechschablonen durch abzutastende Zeichnungen ersetzt. Es kennzeichnet diese Maschinen, daß an einem Ende des Quersupportes ein Photoskop und am anderen Ende die Einspannungsvorrichtung für den Drehstahl angebracht ist. Der Quersupport befindet sich auf dem Vertikalsupport.

Das Arbeitsprinzip einer solchen Anlage besteht darin, daß von einer Lichtquelle nach entsprechender Bündelung ein Lichtstrahl auf eine Schwarz/Weiß-Zeichnung geworfen wird, deren Umrisse mit denen des zu drehenden Isolators identisch sind. Durch Reflexion gelangt ein Teil des Lichtes von der Zeichnung auf eine Photozelle. Ihr elektrischer Widerstand verringert sich mit der Erhöhung der Intensität des reflektierten Strahls. In der Sollage – das ist in der Regel die Lage, in der der Leuchtfleck des Fühlers zur Hälfte den schwarzen Strich auf der gezeichneten Schablone trifft – hat der Photowiderstand einen mittleren Widerstandswert. Jede Abweichung des Leuchtflecks von der Sollage führt zu einem veränderten Widerstandswert, der nach Vergleich mit einem Festwert und entsprechender Differenzbildung zu einem Signal führt, das über Zwischenschritte die Supportbewegung auslöst. Auf diese Art und Weise wird mit rein hardwaremäßiger Informationsverarbeitung kontinuierlich die gesamte Schablone abgetastet und ihre Form mittels Drehstahls auf den Hubel übertragen. Die Schablone liegt in der Regel im Maßstab 1:1 vor.

Kommt es darauf an, die Vorschubgeschwindigkeit an bestimmten Stellen des Schirmes zu verlangsamen, dann kann eine Schwarz/Weiß-Zeich-

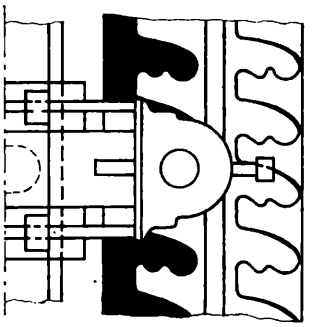


Bild 3.76. Zusatzvorrichtung zur Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit beim fotoelektrischen Kopierdrehen von Hochspannungsisolatoren [190]

nung eingesetzt werden, auf der die für eine langsamere Geschwindigkeit vorgesehenen Bezirke als dicke Linien ausgewiesen sind. Eine zusätzliche Lichtquelle tastet die verstärkten Konturen ab. Das Signal wird ebenfalls dem Steuerkopf des Supportes zugeführt. Bild 3.76 zeigt rechts eine solche Einrichtung [190]. Mit dieser Anordnung ist es möglich, die Kopiergeschwindigkeit während eines Kopiervorganges zu verändern.

Maschinen, die nach dem fotoelektrischen Prinzip arbeiten, können bis zu einer Arbeitshöhe von 3500 mm und in Ausnahmefällen auch darüber ausgeführt werden. Als Schneidwerkzeug wird in der Regel eine Stahlschlinge eingesetzt, die die Herstellung fast aller vorkommenden Isolatorentypen ermöglicht. Moderne Maschinen sind weiterhin so ausgeführt, daß das Einsetzen und Einspannen der Hubel automatisch erfolgt, ebenso das Herausnehmen der fertig gedrehten Isolatoren.

Sollen Isolatoren mit einer Bohrung oder anderen Aussparungen versehen werden, so verwendet man Ausdrehmaschinen oder kombinierte Bohr- und Kopierdrehmaschinen [191]. Mit Hilfe einer automatischen Bohrvorrichtung können zylindrische, konische und andere Bohrungen hergestellt werden. Bei den kombinierten Bohr- und Kopierdrehautomaten arbeiten Bohr- und Abdrehvorrichtung gleichzeitig und unabhängig voneinander. Die Spantiefe und der Bohrvorschub sind auch hier stufenlos regelbar.

Ein Ausführungsbeispiel für einen Kopierdrehautomaten zur Herstellung von Hochspannungsisolatoren durch Abdrehen im lederharten Zustand wird in Abschnitt 4.4.1. behandelt. In Abschnitt 4.4.2. werden eine Weißformgebungsmaschine mit NC-Steuerung sowie die dazugehörigen Bearbeitungswerkzeuge beschrieben, die sich grundsätzlich von den profilierten Metallschlingen der Lederhartbearbeitung unterscheiden [192].

3.4.1.3. Probleme für das Kopierdrehen von stranggezogenen Hubeln

Die physikalisch-keramischen Vorgänge bei der Formgebung von Isolatoren müssen in engem Zusammenhang mit der Herstellung der Hubel und der geforderten Erzeugnisqualität gesehen werden. Während der eigentliche Abdrehvorgang keramisch als weniger problematisch angesehen werden kann, ist die Herstellung der Hubel auf Schneckenpressen nach wie vor mit erheblichem Risiko verbunden.

Die hohen Anforderungen an die Festigkeit von Hochspannungsisolatoren verlangen, daß bereits die Hubel äußerst homogen sind und sich durch Texturarmut auszeichnen. Es ist deshalb notwendig, die Herstellung der Hubel und die Hubel selbst vor allem während des Trockenvorganges durch geeignete Prüf- und Kontrollmaßnahmen zu überwachen.

Für das Ziehen von Hubeln ist die Kontrolle des Vakuums besonders wichtig. Um Texturen, insbesondere die gefürchteten S-Texturen, zu vermeiden, sollte das Vakuum 96 % bzw. der Druck 37 kPa betragen. Wegen der genaueren Anzeige ist es günstig, anstelle eines Zeiger-Vakuummeters ein Quecksilber-U-Rohr-Manometer zu verwenden [190].

Für die Ausbildung der Pressenteile, wie Schnekkenwelle, Mundstück und Preßkopf, gelten die in Abschnitt 3.2.3.6. ausgewiesenen allgemeinen Richtlinien, die bei der Vermeidung von Texturen beachtet werden müssen. Die Qualität des Vollhubels bezüglich Texturfreiheit läßt sich in der laufenden Produktion unkompliziert durch Schütteln einer dünnen Masseschеibe feststellen. Eine sehr oft benutzte Methode ist das Eintauchen von Hubelstücken in fast kochendes Wasser. Die Zeit bis zum Zerfall des Massestückes stellt ein Maß für die Hubelgüte [193] dar. Weiterhin können die außerdem in Abschnitt 3.2.3.6.

beschriebenen Erkennungsmethoden angewendet werden. Eine moderne Form der Hubelüberwachung erfolgt durch den Einbau eines Ultraschallgerätes. In Verbindung mit einem akustischen Signal machen sich die schlechten Hubelabschnitte bereits während des Strangziehens bemerkbar und können vor einer weiteren Verarbeitung eliminiert werden.

3.4.2. Verfahren zur Verarbeitung feuerfester Gemenge

3.4.2.1. Entwicklungstendenzen

Die Verarbeitung feuerfester Steine nach der herkömmlichen Methode des Aufmauerns war lange Zeit die einzige und ist auch heute noch die vorherrschende Methode im Industrieofen- und Dampferzeugerbau. Zusehends setzen sich aber Verfahren durch, die diese relativ unproduktive Methode in verschiedenen Bereichen des Einsatzes von Feuerfesterzeugnissen ablösen [151, 195]. Zu diesen gehören:

- die Herstellung großformatiger Feuerfeststeine,
- die Vorfertigung von Feuerbetonelementen,
- die Verarbeitung feuerfester Gemenge und
- die bereits in Abschnitt 3.2.5.2. beschriebene Anwendung von Plastiks.

Mit der Produktion von Feuerbetonfertigteilen wurde die Voraussetzung für eine industrielle Montagebauweise geschaffen, und die Herstellung feuerfester Gemenge sowie von Plastiks bietet die Möglichkeit, größere Elemente fugenlos, und zwar direkt beim Verbraucher, herzustellen.

Die wesentlichsten Formgebungsverfahren für die Verarbeitung feuerfester Gemenge sind das Stampfen einschließlich Vibrationsverdichten, das Vergießen, das Torkretieren sowie das Slingern.

3.4.2.2. Stampfen und Vibrationsverdichten

Stampfen und Vibrationsverdichten sind Formgebungsverfahren, die im keramischen Betrieb, z. B. zur Herstellung großformatiger Wannensteine für die Glasindustrie oder von Feuerbetonfertigteilen, zur Anwendung kommen. Aber auch beim Verbraucher von Feuerfestgemengen setzt man diese Verfahren in breitem Umfang ein.

Nach dem *Stampfverfahren* werden vorwiegend unplastische Massen verarbeitet. Die meist krümelige und wenig Zusammenhang zeigende, d. h. kaum bildsame Masse wird mit Preßluft- oder Elektrostampfern verdichtet. Die dabei auftretende Bewegung bewirkt, daß infolge von Thixotropieeffekten die Masse besser fließt und die Verdichtung erleichtert wird.

Aufgrund der hohen Beanspruchung müssen die Formen, in die die Masse eingestampft wird, äußerst stabil sein. In der Regel bestehen sie aus verstellbaren Stahlplatten, die – durch Rippen oder Wülste verstärkt – als sogenannte Doppeltürformen mit Einlagen aus Stahl oder Holz, das mit 5-mm-Eisenblech beschlagen ist, ausgebildet sind. Damit der Formenpark nicht so groß wird, achtet man darauf, daß durch zweckmäßige Gestaltung der Formen eine disponible Verwendbarkeit erreicht werden kann.

Bevor die Masse eingestampft wird, werden die Formen mit Öl bestrichen. Das Einstampfen kann nach zwei Methoden erfolgen. Entweder fortlaufend, indem man die Masse kontinuierlich zurieseln läßt, oder diskontinuierlich, indem die Masse schichtenweise aufgestampft wird. Zu beachten ist hierbei, daß jede gestampfte Schicht wieder aufgerauht werden muß, bevor neue Masse eingefüllt wird. Die Stampfer sind mit ihren keilförmigen oder profilierten Füßen so ausgebildet, daß sie das Ausstampfen von Ecken, was insbesondere für komplizierte, großformatige Erzeugnisse wichtig ist, gut ermöglichen. Für gestampfte Formlinge gilt gleichermaßen wie für alle keramischen Erzeugnisse das Homogenitätsprinzip. Vor allem muß das Stampfen über die gesamte Oberfläche gleichmäßig erfolgen. Am Ende des Stampfvorganges wird ein sogenanntes Polierbrett mit einer Schutzschicht aus Kunststoff aufgelegt und durch vorsichtiges Stampfen die Oberfläche des Erzeugnisses geglättet. Zur Kontrolle der Verdichtung erfolgt die Bestimmung der Frischmasse des Erzeugnisses.

Durch *Vibrationsverdichten*, auch Rütteln genannt, werden vorwiegend Feuerbetonfertigteile und Konverterböden hergestellt. Ähnlich

wie bei der Bauelementeproduktion für den Industrie- und Wohnungsbau gibt man feuerfeste Zuschlagstoffe mit Mikrofüllern, Bindemitteln und Wasser in Formen und verdichtet sie auf Rütteltischen. Mit Hilfe mechanischer, elektromagnetischer oder pneumatischer Rüttler wird die Masse mit 3000 bis 4000 Schwingungen je Minute beaufschlagt [153]. Die Folge davon sind eine gute Beweglichkeit der Partikeln und ein insgesamt verbessertes Fließverhalten der Masse. Die Details der Form, insbesondere die Ecken, werden gut ausgefüllt. Trotzdem verläuft die Verdichtung nicht immer gleichmäßig, da die Masse den Bewegungen des Rütteltisches folgt und eine entsprechende Textur annimmt.
Auch die Entmischungsgefahr ist beim Vibrationsverdichten nicht unproblematisch. Bestimmte Massen, z. B. für Silika- und Schamottesteine, können unter anderem aus diesem Grund bei den angegebenen hohen Frequenzen nicht durch Vibrationsverdichten verformt werden. Für derartige Massen ist die Anwendung gewöhnlicher Rüttelverfahren und von *Rüttelschlagverfahren* möglich. Bei diesem Verfahren wird mit geringer Frequenz gerüttelt und gleichzeitig mit einem schweren Fallhammer die Masse eingeschlagen.
Eine weitere Möglichkeit der Vibrationsverdichtung besteht im *Vibrationspressen*.

3.4.2.3. Torkretieren

In Analogie zum Betonspritzverfahren oder Mörtelspritzverfahren wird das Torkretieren als Reparaturverfahren für hitzebeständige und feuerfeste Ausmauerungen in Dampferzeugern sowie Industrieöfen angewendet. In speziellen Anwendungsfällen kommt das Torkretieren auch für monolithische Zustellungen zum Einsatz. Der damit verbundene Wegfall der Mörtelfugen eines Mauerwerkes hat den Vorteil, daß die Zerstörung der Feuerfeststeine verringert wird. Die Reisedauer von Industrieöfen kann damit entscheidend verbessert werden [197]. Bei Teilausbesserungen kommt es darauf an, die Spritzmasse in ihrer chemischen Zusammensetzung auf das zu behandelnde Mauerwerk abzustimmen.
Nach der Durchführung des Verfahrens kann man zwei Varianten unterscheiden:

- Naßtorkretieren bzw. Schlammspritzen und
- Trockentorkretieren.

Das *Naßtorkretieren* ist dadurch gekennzeichnet, daß ein Spritzgemenge mit mörtelartiger Konsistenz verarbeitet wird. Zur Durchführung des Verfahrens wird dieses Gemenge in einen Druckbehälter gefüllt, aus dem es mittels Überdrucks über einen Transportschlauch und eine Lanze zur Reparaturstelle gelangt. Die Lanze, die in der Regel nichts anderes als ein Metallrohr mit einer Einengung in der Mündung ist, wird möglichst nahe an die Reparaturstelle herangeführt. Die aufgetragene Schicht soll nicht stärker als 30 mm sein. Anderenfalls ist damit zu rechnen, daß die Schicht wegen ihrer mörtelartigen Konsistenz unter ihrem Eigengewicht abrutscht, bevor sie verfestigt ist. Eine zweite oder weitere Schichten können erst aufgetragen werden, wenn die vorhergehende festgebrannt ist.
Das Naßtorkretieren hat sich insbesondere in der Stahlindustrie bewährt, wo die zugänglichen Bereiche der *Siemens-Martin*-Öfen, z. B. Pfeiler und Rückwände, durch Torkretieren ausgebessert werden. Bei Dampferzeugern kann man z. B. während des Betriebes das Futter von Rauchgasrückführungen durch Torkretieren ausbessern [152].
Beim *Trockentorkretieren* wird ein trockenes Gemenge pneumatisch in Schläuchen bis zur Spritzdüse befördert, wo es mit der Bindeflüssigkeit, im einfachsten Falle Wasser, vermischt wird. Das Trockentorkretieren ist insbesondere für Kaltreparaturen und Neuzustellungen geeignet. Bei einem Einsatz für Heißreparaturen müssen die Düse dicht an die Reparaturstelle herangeführt und die Lanze gut gekühlt werden.
Zum Torkretieren werden die von der Feuerfestindustrie gelieferten Gemenge verarbeitungsfertig eingesetzt. Bevor das Gemenge verspritzt wird, ist es erforderlich, den Untergrund der Reparaturstelle entsprechend vorzubereiten. Alle losen Anhaftungen, wie Schlacke, Asche, Ruß usw., müssen durch Abstrahlen oder Abkratzen entfernt werden. Festsitzende Ausschmelzungen brauchen nicht beseitigt zu werden. Sollen sehr glatte Wände oder metallische Flächen torkretiert werden, so sind Halterungsstifte anzubringen, die das Abrutschen des Gemenges verhindern.
Für die Durchführung des Torkretierens werden

mindestens eine Arbeitskraft für die Gerätebeschickung, eine Arbeitskraft für die Gerätebedienung und eine weitere für die Führung der Spritzdüse benötigt. Das Auftragen des Gemenges erfolgt von unten nach oben, und zwar so, daß zunächst eine Schwelle (Halterung im Mauerwerk oder Halterungshilfen) angesetzt wird, von der aus gleichmäßige Schichten auf das Mauerwerk aufgespritzt werden. Die Düse soll während des Aufspritzens eine pendelartige Bewegung beschreiben und die Masse, wie Bild 3.77 zeigt, unter einem Winkel vom 90° auftragen. Der günstigste Abstand zwischen Düse und Wand liegt bei etwa 50 bis 60 cm. Um der Gefahr des Abrutschens der Schichten entgegenzuwirken, ist es günstiger, mehrere dünne Schichten übereinanderzuspritzen als eine oder wenige dicke.

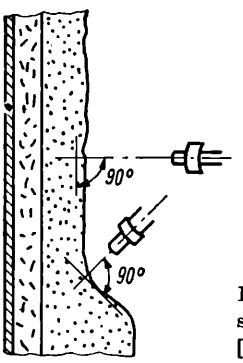


Bild 3.77. Richtige Düsenstellung beim Torkretieren [151]

Nach dem Aufspritzen ist eine Nachbehandlung bzw. eine Trocknung vorzunehmen. Sind die Anlagen während des Torkretierens noch warm und gehen diese sofort nach der Reparatur wieder in Betrieb, z. B. bei Zwischenreparaturen, so wird die Trocknung durch die Speicherwärme des Mauerwerkes realisiert. Erfolgen die Reparaturen bei Raumtemperatur, z. B. bei vollständigen Mauerwerkserneuerungen, so ist eine Nachbehandlung notwendig. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, Trocknungsperioden nach je 50 bis 80 mm Schichtdicke einzulegen. Bei hydraulisch abbindenden Gemengen entfallen diese Trocknungsperioden. Die eigentliche Verfestigung erfolgt bei keramisch abbindenden Gemengen, wenn die Anlage nach einem vorgegebenen Programm auf etwa 1200 °C aufgeheizt wird.

Nach dem angewendeten Verfahrensprinzip kann man Naß- und Trockentorkretiergeräte unterscheiden. Naßtorkretiergeräte werden fast ausschließlich für Reparaturen an *Siemens-Martin*-Öfen eingesetzt. Wesentlich universeller ist der Einsatz von Trockentorkretiergeräten, die in zwei grundsätzlichen Ausführungen gebaut werden [151]:

- Ein- oder Mehrkammerdruckgefäßgeräte mit pneumatischem oder elektrischem Antrieb und
- Dosiertrommelgeräte.

3.4.2.4. Slingern

Ein großer Teil der feuerfesten Gemenge wird nach dem Slingerverfahren verarbeitet, d. h. wurfgeschleudert [195]. Verbreitet ist die Zustellung von Gießpfannen durch Slingern. Die Gießpfannen sind neben den Schmelzanlagen die größten Verbraucher von Feuerfestmaterial in einem SM-Stahlwerk. Als Verschleißfutter für Gießpfannen wurden bisher saure Schamottesteine mit niedrigem Al_2O_3-Gehalt und einem SiO_2-Gehalt $> 65\%$ eingesetzt. Der mit der Ausmauerung verbundene hohe Arbeitszeitaufwand kann wesentlich reduziert werden, wenn die Zustellung durch Slingern erfolgt.

Das Arbeitsprinzip eines Slingers besteht darin, einen kontinuierlichen Gemengestrom mit Hilfe einer umlaufenden Wurfschaufel in einzelne Portionen aufzuteilen und die Masse mit einer hohen Geschwindigkeit in einen seitlich begrenzten Raum zu befördern. Die Durchführung des Slingerns kann mit einem stationären Drehslinger vom Typ DSL IVs 55 [198] erfolgen.

Über Förderbänder wird das feuerfeste Gemenge einem Schleuderkopf zugeführt, in dem eine Wurfschaufel angeordnet ist. Die mit 1500 min^{-1} umlaufende Wurfschaufel hat die Aufgabe, das Gemenge in einzelne Ballen aufzuteilen und diese mit einer Geschwindigkeit von 60 m s^{-1} von oben in einen Spalt zwischen Dauerfutter und Schablone zu werfen.

Durch die hohe kinetische Energie des Massebal lens wird die Masse beim Aufprall gut verdichtet. Der Arm, der den Schleuderkopf trägt, ist in der Pfannenmitte zentriert. Die Umlaufgeschwindigkeit des Schleuderarmes beträgt 7 bis 10 min^{-1}. Durch die umlaufende Bewegung des

Schleuderarmes wird das Gemenge gleichmäßig über den Umfang der Gießpfanne verteilt. Für die Zustellung einer Verschleißschicht werden zwei Arbeitskräfte benötigt. Die Dauer des Slingervorganges beträgt bei einer Wandstärke von durchschnittlich 220 mm und einer Höhe von 3 m etwa 20 bis 25 min.

3.4.3. Spritzgießen unplastischer keramischer Massen

3.4.3.1. Einführung

Das Spritzgießen hat seinen Ursprung in der Metall- und Schriftgießerei und erlangte als Formgebungsverfahren für die Plastindustrie bereits vor 50 Jahren industrielle Bedeutung. In der Keramik wurde dieses Verfahren zunächst in der Oxidkeramik eingesetzt. Eine Anwendung auf diesem Gebiet findet es insbesondere dann, wenn es darauf ankommt, hohe Stückzahlen und komplizierte Formlinge herzustellen. Das Verfahrensprinzip des Spritzgießens unplastischer, keramischer Materialien besteht darin, daß man dem keramischen Pulver eine als Medium oder Trägermaterial bezeichnete organische Substanz zusetzt, die bei Raumtemperatur fest ist und beim Erhitzen erweicht. Das Spritzgießen ist somit in keiner Weise mit dem in Abschnitt 3.1. behandelten Schlickergießen vergleichbar. Im erweichten Zustand verleiht das Trägermaterial der Spritzgießmasse die erforderliche niedrige Viskosität und im erstarrten Zustand dem Spritzgießling die erforderliche Festigkeit.
Zur Durchführung des Verfahrens wird das feingemahlene oxidkeramische Pulver mit einer vorgegebenen Menge des Trägermaterials unter Wärmezuführung vermischt und nach dem Abkühlen granuliert. Anschließend füllt man die Granalien in den Zylinder des Formgebungsaggregates. In diesem Spritzzylinder wird die Masse wiederum erwärmt und dann verspritzt.
Als Trägermaterial werden Thermoplaste und Wachse eingesetzt.

3.4.3.2. Anforderungen an das Spritzgießmedium

Die Anforderungen, die an ein Spritzgießmedium bzw. das Trägermaterial gestellt werden, sind im wesentlichen durch zwei Gesichtspunkte bestimmt:

- Herstellung einwandfreier Spritzlinge und
- Gewährleistung der Festigkeit und Formbeständigkeit des Spritzlings bei der Entfernung der Plaste durch Erhitzen.

Versuche mit aushärtbaren Plasten, die dem zweiten Gesichtspunkt besser entsprechen als Thermoplaste und Wachse, wurden aus materialökonomischen Gesichtspunkten fallengelassen, da einmal ausgehärtete Plaste, die z. B. in den technologisch bedingten Abfall und somit in die Rücklaufmasse gelangen, nicht wieder verarbeitet werden können.
Somit bleibt das Spritzgießen vornehmlich auf den Einsatz von Thermoplasten beschränkt, die durch ihr reversibles Erweichungs-/Erstarrungs-Verhalten natürlich auch nicht unproblematisch sind. Nach dem Verspritzen solcher Massen wird dem Spritzling durch die Metallform Wärme entzogen, und es kommt zur Erstarrung. Da die keramische Masse aber durch Brennen verfestigt werden muß, wird der Bereich der Erweichung der Thermoplaste und Wachse zwangsläufig noch einmal durchlaufen, und der Spritzling läuft Gefahr, flüssig zu werden und seine Form zu verlieren. Um diesem Verhalten entgegenzuwirken, ist es notwendig, den Thermoplast bzw. das Wachs vor dem Erweichen aus dem Preßling zu entfernen, was durch einen Trocknungs- bzw. Verdampfungsprozeß – gegebenenfalls durch Unterdruck – erreicht wird. Gut bewährt haben sich Zusätze mit niedrigem Dampfdruck, wie Naphthalin, die beim Erhitzen sublimieren, oder auch Stoffe mit einem hohen Kohlenwasserstoffgehalt, die beim Brand einer Deformation entgegenwirken.

3.4.3.3. Trägermaterialien für das Spritzgießen

Die als Trägermaterialien verwendeten Thermoplaste und Wachse werden nach *Wedemeyer* [199] wie folgt definiert und beschrieben:

Die Gruppe der *Thermoplaste* umfaßt die Polymere, die beim Erhitzen erweichen und fließen, aber nicht härtbar sind. Beim Abkühlen erstarren sie unter Beibehaltung der ihnen bei höherer Temperatur verliehenen Form. Die Thermoplaste sind aus linearen oder verzweigten Makromolekülen aufgebaut. Zwischen den einzelnen Makromolekülen wirken Nebenvalenzkräfte, die eine örtliche Ausrichtung der Makromoleküle bewirken können. Dadurch entsteht ein Aufbau, der dem eines Kristallgitters ähnlich ist. Ist die Anordnung der Makromoleküle unregelmäßig, so wird der Thermoplast als »amorph« bezeichnet. Die Ausbildung der »Kristallite« ist von der Erstarrungsgeschwindigkeit abhängig. Langsames Abkühlen begünstigt die Ausbildung der »Kristallite«. Eine vollständige »Kristallisation« wird aber nicht erreicht. Es entstehen »kristalline« Bereiche, zwischen denen »amorphe« Zonen eingebettet sind. Der mehr oder weniger »kristalline« Aufbau beeinflußt die Eigenschaften des Plastes und der mit ihm durch Spritzgießen geformten Körper. In der Regel steigen mit zunehmender »Kristallisation« die Festigkeit, die Steifigkeit, die Härte und die Formbeständigkeit, während die Transparenz abnimmt [199].

Die *Wachse* sind natürlich oder künstlich gewonnene Stoffe, die bei 20 °C knetbar fest oder brüchig sind, einen grob- bis feinkristallinen Aufbau mit durchscheinendem bis opakem, aber nicht glasartigem Aussehen aufweisen. Oberhalb 40 °C schmelzen sie mit stark temperaturabhängiger Konsistenz und Löslichkeit. Der Wachszustand ist durch das Vorliegen komplexer Stoffgemische gekennzeichnet. Wachsschmelzen sind Mischsolvate, die beim Abkühlen zur Assoziation und zur Kristallisation neigen. Die Kristallisation ist durch Mischkristallbildung und das Auftreten von Eutektika gekennzeichnet.

Ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrem Aufbau nach sind sich die Wachse trotz unterschiedlichster Herkunft ähnlich, da sie aus langkettigen Kohlenwasserstoffen, Estern oder dgl., aufgebaut sind. Im wesentlichen kann man die Wachse in drei große Gruppen einteilen [199]:

- Wachse ohne funktionelle Gruppen,
- Wachse mit funktionellen Gruppen,
- wachsähnliche Stoffe (Wachshilfsstoffe).

3.4.3.4. Fließverhalten von Spritzgießmassen

Spritzgießmassen zeigen, ähnlich wie bildsame keramische Massen, ein strukturviskoses Fließen und damit erhebliche Abweichungen vom *Newton*schen Fließverhalten.

Eine interessante Erscheinung beim Spritzgießen stellt der sogenannte »memory effect«, worunter man das Schwellverhalten oder die Strangaufweitung versteht, s. Bild 3.78 [199], dar. Die Ursache für dieses Verhalten besteht in der Entropieelastizität der Thermoplaste. Die

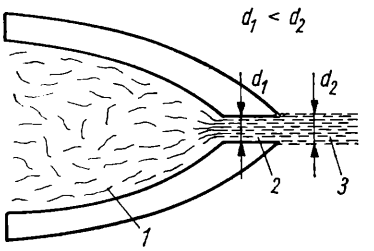


Bild 3.78. Gedächtniseffekt bei Spritzgießmassen
1 Spritzgießmasse, *2* Orientierung in der Düsenöffnung, *3* Strangaufweitung

verknäulten Molekülketten, die durch *Van-der-Waals*sche und Dipolkräfte miteinander verbunden sind, werden beim Durchgang durch die Düse infolge des Druckes gestreckt. Nach dem Verlassen der Düse tritt eine elastische Rückdeformation ein. Die mit der Streckung verbundene Orientierung ist für das Spritzgießen von großer Bedeutung, da durch sie Spannungen eingefroren werden, die sich beim nachfolgenden Erhitzen des Spritzlings lösen und zur Rißbildung führen können. In der Praxis ist man deshalb bemüht, die Länge der Düse möglichst klein zu halten.

Bezüglich der Zusammensetzung von keramischen Spritzgießmassen läßt sich kein Rezept angeben. Für jedes oxidkeramische Material sind im Hinblick auf die Fließeigenschaften, das Brennverhalten und den Feststoffanteil unterschiedliche Faktoren zu berücksichtigen. Der Einsatz von Tonen zur Überbrückung des großen Temperaturintervalls zwischen dem Austreiben des Kunststoffes und der Sinterung des keramischen Pulvers setzt einen höheren Anteil an

Trägermaterial voraus. Für das Brennverhalten haben sich Harze mit hohem Kohlenstoffanteil als günstig erwiesen, die beim Ausheizen ein festes Kohlenstoffgerüst bilden und den geformten Körper zusammenhalten.

3.4.4. Spritzgießen und Spritzprägen bildsamer keramischer Massen

Durch die Entwicklungsarbeiten von *Handke* [200, 201] wurde ein Verfahren zur Herstellung feinkeramischer Erzeugnisse durch *Spritzgießen* bekannt, bei dem als Ausgangsmaterial die bildsame keramische Masse ohne Zusätze von Trägermaterialien verwendet wird.
Das Formgebungsprinzip besteht darin, daß die bildsame Masse bei der Verformung so stark beschleunigt wird, daß sie mit einer Mindestgeschwindigkeit von etwa 15 bis 20 $m\,s^{-1}$ über eine relativ eng gehaltene Düse in eine allseitig geschlossene Form gespritzt wird. Die relativ hohe Verformungsgeschwindigkeit steht mit der Vermeidung von Fließtexturen in engem Zusammenhang. Bei *Reynolds*-Zahlen oberhalb 3000 wird eine Turbulenz erzeugt, die eine Orientierung der Teilchen während des Fließens nahezu ausschließt. Zum anderen bewirkt die hohe Fließgeschwindigkeit eine Entwässerung der Masse. Durch den Aufprall der Masse auf die Formenwand und das dort anliegende Vakuum erfolgt eine partielle Phasentrennung zwischen den Feststoffteilchen und Wasser, wobei ein Teil des Wassers über die Kapillaren der Form abgeführt wird und die Feststoffteilchen mit dem verbleibenden Wasser den lederharten Formling bilden.
In engem Zusammenhang mit der Entwicklung des Spritzgießverfahrens für bildsame Massen steht die Entwicklung spezieller Formen, da die typischen Eigenschaften der Gipsform für dieses Verfahren bedeutungslos sind. Das Verfahrensprinzip des Spritzgießens bildsamer Massen ermöglicht und verlangt den Einsatz von Dauerformen. Mit der Entwicklung der *Keraplast*-Dauerformen [201] ist diese Aufgabe weitgehend gelöst worden.
Als Vorteile des Spritzgießverfahrens wurden folgende genannt:

- Substitution der Gipsformen durch Dauerformen und der damit verbundene geringere Aufwand für die Formenbereitstellung sowie Verringerung der Ausfallzeiten durch Formenwechsel,
- texturfreie, äußerst formbeständige Rohlinge mit hervorragender Oberflächengüte,
- geringe Toleranzen bezüglich der Endabmessungen,
- Verringerung der Formenanzahl je Anlage,
- Wegfall der Lederharttrocknung,
- günstigeres Brennverhalten, geringe Tendenz zur Ausbildung »fahnenkrummer« Teller und »durchgegangener« Böden (s. Abschnitt 3.2.4.5.).

Trotz dieser Vorteile konnte sich dieses Verfahren in der Praxis bisher nicht durchsetzen, weil der maschinentechnische Aufwand für das Formgebungsaggregat extrem hoch ist.
Ebenfalls in der Entwicklung befindet sich das *Spritzprägeverfahren*. Der wesentlichste Unterschied zwischen dem Spritzprägen und dem Spritzgießen besteht darin, daß beim Spritzprägen eine fast lederharte Masse (Feuchte $\approx 16\,\%$) mit niedrigem Druck in eine Metallform eingespritzt und danach mit hohem Druck zu fertigen Erzeugnissen ausgeformt und verdichtet wird [202]. Der Einsatz von lederhart-feuchter Masse bietet die Möglichkeit der Anwendung von Metallformen. Die Formlinge sind sofort nach der Formgebung manipulierbar, d. h., sie können mittels Vakuumsaugers oder dgl. umgesetzt werden, ohne daß ihnen vorher Feuchtigkeit entzogen werden muß.
Auch das Spritzprägeverfahren hat sich in der Praxis noch nicht behaupten können.

3.4.5. Reaktionsthermische Formgebung

Die Grundlage der reaktionsthermischen Formgebung bildet die Ausnutzung der exothermen Reaktionen von Stoffen und Stoffgemischen während der Sinterung. Die mit den chemischen Reaktionen verbundene Abgabe von Wärmeenergie begünstigt sowohl die Formgebung als auch die Sinterung entscheidend. Geeignete Reaktionen für eine technische Anwendung des Prinzips sind die Oxydationsreaktionen von Metallen und die Übergangsreaktionen des Sauerstoffs von einem edleren Metall auf ein unedleres. Zur Steuerung des Reaktionsablaufs können Ballaststoffe dazugegeben werden.

Nach *Meyer-Hartwig* [207] ermöglicht das genannte Wirkprinzip folgende verfahrenstechnische Lösungen:

- Die Pulvermischung wird in einer Preßform zur Reaktion gebracht und während des Reaktionsablaufs oder unmittelbar danach verdichtet.
- Ein vorgepreßtes Pulver wird im Ofen zur Reaktion gebracht und anschließend nachverdichtet.
- Ein Körper wird hergestellt und gezündet.
- Das Pulver wird in einer Form gezündet.
- Das Pulver wird kontinuierlich aufgegeben, gezündet und zu einem Strang ausgepreßt.

Geeignet ist das Verfahren zur Herstellung von Halbleitern, hochtemperaturfesten und temperaturwechselbeständigen Werkstoffen, Cermets und zum Aufbringen dünner Schichten auf Metalle. Die Vorteile des Verfahrens sind:

- niedrige Ausgangstemperaturen für den Reaktionsbeginn,
- hohe Dichte der Körper und
- kurze Reaktionszeit.

Die Nachteile des Verfahrens bestehen vor allem in der begrenzten Anwendbarkeit und dem relativ hohen technischen und ökonomischen Aufwand.

3.4.6. Thermoplastische Formgebung

Unter thermoplastischer Formgebung versteht man ein Verfahrensprinzip, bei dem vorgeformte keramische Rohlinge in einem Ofen erhitzt und im thermoplastischen Zustand durch Nachpressen umgeformt, d. h. fertiggeformt werden [208].
Zur Durchführung des Verfahrens könnte z. B. ein Tunnelofen verwendet werden, bei dem über eine seitliche Öffnung die Entnahme der Rohlinge aus der heißen Zone möglich ist. Das Nachpressen der Rohlinge erfolgt mit relativ niedrigen Preßdrücken. Als Formen kamen bisher beheizte Stahlformen und mullitgebundene SiC-Formen zur Erprobung. Nach dem Verpressen werden die Erzeugnisse wieder in den Ofen gegeben, gegebenenfalls bei relativ niedrigen Temperaturen fertiggesintert und dann auf Raumtemperatur abgekühlt.

Die thermoplastische Formgebung hat bisher den Rahmen der Versuchsproduktion nicht überschritten. Als industrieller Anwendungsfall ist lediglich die Herstellung von Verblendsteinen (face bricks) in den USA bekannt geworden.

3.4.7. Explosivverdichten

3.4.7.1. Anwendungsgebiete der Explosivverdichtung

Gegenüber dem reaktionsthermischen Verfahren stellt das Explosivverdichten oder Explosivkompaktieren ein technisch relevantes Formgebungsverfahren mit einer überaus großen Anwendungsbreite dar. Das Explosivkompaktieren wurde als pulvermetallurgisches Verfahren entwickelt. Ohne Anwendung von Bindemitteln ist es möglich, metallisches Pulver auf nahezu 100 % der theoretischen Dichte zu komprimieren. Selbst solche hochschmelzenden Metalle, wie Wolfram und Molybdän, lassen sich mit diesem Verfahren auf eine fast 100prozentige Dichte bringen. Die Festigkeit der explosivverdichteten Werkstücke ist so groß, daß diese anschließend mechanisch bearbeitet werden können [196].
In der Metallverarbeitung dient das Explosivverdichten zum Umformen großer Metallteile, z. B. für die Luftfahrtindustrie, im Schiffbau und im Fahrzeugbau.
In der technischen Keramik hat das Explosivkompaktieren nicht nur für die Verdichtung von Oxiden eine Bedeutung erlangt. Neue Perspektiven eröffnet dieses Verfahren auch der Legierungs- und Cermetentwicklung sowie der Herstellung von Verbundwerkstoffen. Aus stöchiometrisch zusammengesetzten Mischungen lassen sich Carbide, Boride und Nitride gewinnen. Interessante Möglichkeiten bietet das Explosivverdichten auch für die Herstellung supraleitender Verbindungen, wie z. B. Nb_3Sn [209].

3.4.7.2. Verfahrensprinzipien der Explosivverdichtung

Nach der verfahrenstechnischen Ausführung unterscheidet man zwei Arten der Explosivverdichtung, das sogenannte indirekte Verdichten und das direkte Verfahren.

Beim *indirekten* Verdichten werden zwei Stempel, zwischen denen sich das Pulver befindet, aufeinandergeschossen. *La Roca* und *Pearson* [210] entwickelten die erste Anordnung zum Explosivverdichten, deren prinzipieller Aufbau in Bild 3.79 dargestellt ist. Zur Verdichtung des Pulvers verwendeten sie zwei Stempel (Stößel), die in einem Zylinder angeordnet waren.

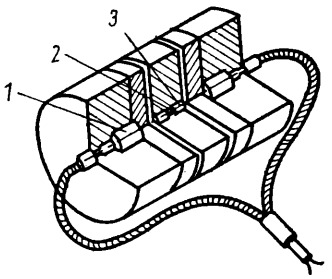


Bild 3.79. Prinzipieller Aufbau einer Anordnung für das indirekte Explosivverdichten [210]
1 Sprengstoff, *2* Pulver, *3* Stößel

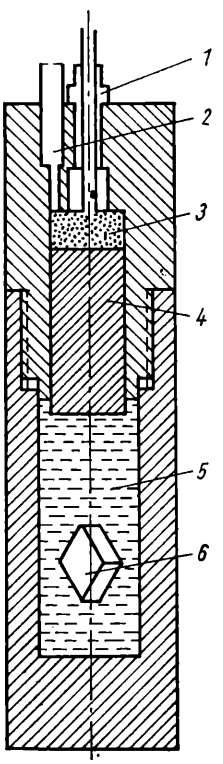


Bild 3.80. Indirekte Explosivverdichtung unter Anwendung von Flüssigkeit zur Druckübertragung [209]
1 Zünder, *2* Druckausgleich, *3* Sprengstoff, *4* Kolben, *5* Wasserkammer, *6* zu verdichtendes Pulver

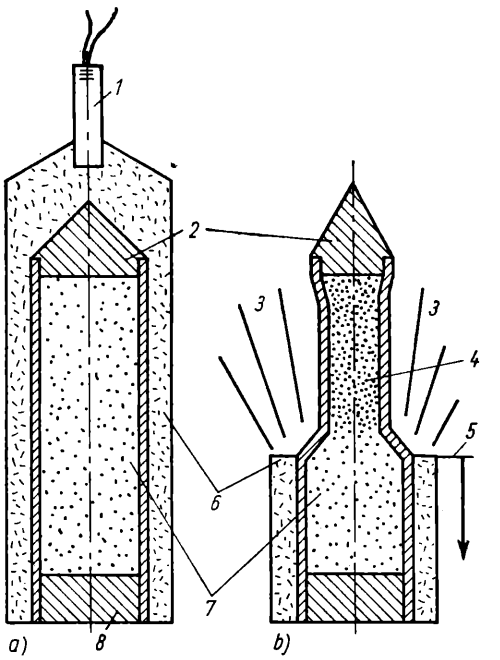


Bild 3.81. Prinzipieller Aufbau einer Anordnung für das direkte Explosivverdichten [209]
a) vor der Explosion
b) während der Verdichtung
1 Zünder, *2* oberer Abschlußstopfen, *3* expandierende Gase, *4* verdichtetes Pulver, *5* Detonationsfront, *6* Sprengstoff, *7* zu verdichtendes Pulver, *8* unterer Abschlußstopfen

Andere Methoden der indirekten Verdichtung sind dieser entlehnt. So auch ein Prinzip, bei dem eine Flüssigkeit als Druckübertragungsmedium benutzt wird. Bild 3.80 zeigt eine solche Anordnung.

Allen indirekten Methoden gemeinsam ist die Notwendigkeit des Einsatzes von massiven Bauteilen, die in Abhängigkeit von der Brisanz des Sprengstoffes den apparativen Aufwand solcher Anlagen erhöhen.

Höchste Dichten bei geringstem apparativem Aufwand ermöglicht das *direkte* Explosivkompaktieren. Den prinzipiellen Aufbau einer solchen Anordnung zeigt Bild 3.81. Im Inneren eines Rohres befindet sich das zu verdichtende Pulver. Dieses Hüllrohr besteht in der Regel aus Stahl mit einem Durchmesser und Wanddicken von z. B. 10 mm × 0,5 mm, 25 mm × 1,5 mm usw. [209]. Zur Aufnahme des Sprengstoffes dient ein konzentrisch dazu angeordnetes Plaste-

oder Papprohr. Die Größe dieses Rohres hängt von der eingefüllten Sprengstoffmenge ab. Wichtig ist dabei, daß der Sprengstoff das innere Rohr gleichmäßig umgibt. Vor dem Zünden wird die Vorrichtung über einem Sandbett aufgehängt. Nach der Explosion ist nur noch das Stahlrohr mit der verdichteten Substanz vorhanden. Das Stahlrohr wird aufgetrennt, und die Probe kann entnommen werden.

Die Verdichtung des Pulvers setzt mit der Zündung des Sprengstoffes ein und läuft in axialer Richtung über das Rohr hinweg (s. Bild 3.81 b). Der in der Detonationsfront (*5*) erzeugte hohe Druck preßt das Rohr zusammen. Die dabei erreichten Detonationsgeschwindigkeiten liegen je nach Sprengstoff zwischen 1 700 und 8 400 m s^{-1}. Das bedeutet, daß der Druck, der 30 000 MPa betragen kann, nur einige Mikrosekunden wirkt.

Die Anwendung des direkten Explosivkompaktierens beschränkt sich gegenwärtig auf die Herstellung von Teilen mit axialer Symmetrie, z. B. Stäbe oder Hohlkegel. Die Länge der Erzeugnisse spielt dabei keine Rolle. Mit zunehmender Größe nimmt allerdings die Umweltbelästigung zu.

Die wichtigsten Einflußgrößen beim Direktverfahren – Druck und Detonationsgeschwindigkeit – werden durch den verwendeten Explosivstoff bestimmt. Der von einem Explosivstoff erzeugte Druck kann nach [209] durch Gl. (3.29) angegeben werden:

$$p = 250\,\varrho\,v_D^2 \qquad (3.29)$$

p Explosivdruck (in MPa)
ϱ Dichte des Sprengstoffes (in g cm^{-3})
v_D Detonationsgeschwindigkeit (in km s^{-1}).

Hiernach ist der beim Explosivverdichten einwirkende Druck dem Quadrat der Detonationsgeschwindigkeit proportional. Da die Detonationsgeschwindigkeit für jeden Sprengstoff eine konstante Größe ist, heißt das, daß auch der Druck durch die Art des Sprengstoffes bestimmt wird, nicht aber durch die Menge. Die eingesetzte Sprengstoffmenge hat lediglich einen Einfluß auf die Dauer der Druckeinwirkung.

Für das Ergebnis der Verdichtung ist die Schockwellenführung von Bedeutung. Der Druck, der durch die Explosion auf die Behälterwandung ausgeübt wird, setzt sich mit mehr als Schallgeschwindigkeit im Pulver fort. Wie Bild 3.81 b zeigt, liegt vor der Verdichtungswelle das unverdichtete Pulver und dahinter das kompaktierte. Beim Übergreifen der Verdichtungswelle von der Behälterwandung zum Probenzentrum kommt es zur Überlagerung von zwei Vorgängen [209]. Infolge der plastischen Verformungsarbeit und der Arbeit für die Kornzerkleinerung nimmt die Intensität der Schockwelle ins Erzeugnisinnere ab. Gleichzeitig erhöht sich infolge der Konvergenz die Intensität der zylindrischen Welle in gleicher Richtung. Je nachdem, welcher Anteil überwiegt, nimmt resultierend die Intensität der Schockwelle zum Probenzentrum hin zu oder ab.

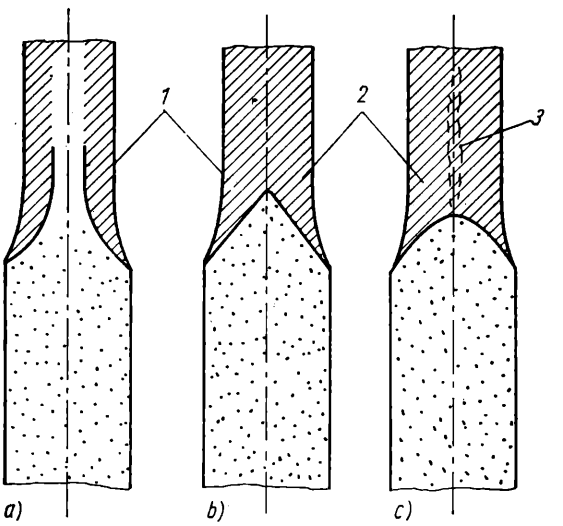


Bild 3.82. Möglichkeiten für die Ausbreitung der Schockwelle in der Probe [209]
a) Absorption > Konvergenzanteil
b) die Einflüsse heben sich gegenseitig auf
c) Absorption < Konvergenzanteil
1 Behälter, *2* verdichtetes Pulver, *3* Risse

Nach *Prümmer* [209] können die in Bild 3.82 ausgewiesenen drei Fälle eintreten. Im Fall *a*) ist die Absorption der Welle groß und der Anteil der Konvergenz gering. Der Fall *b*) zeigt den idealen Fall, bei dem sich die Schockwellengeschwindigkeit und der Schockwellendruck beim Fortschreiten der Welle nicht verändern. Im Fall *c*) nimmt die Schockwellenintensität bei geringer Absorption zu. Für die praktische Durchführung des Explosivpressens heißt das,

daß es im Falle der Unterverdichtung (Bild 3.82a) im Probekern zu porösen Zonen und bei Überverdichtung (Bild 3.82c) zu Aufschmelzungen und Rissen kommt. Angestrebt wird der Fall nach Bild 3.82b. Die Gestaltung der Pulverform und die Auswahl des Sprengstoffes nach Art und Menge sind auf diesen Fall abzustimmen.

Mit der Beschreibung dieser Sonderverfahren soll das Kapitel 3, »Formgebungsverfahren« abgeschlossen werden. Auf die Behandlung der Herstellung schmelzflüssig gegossener feuerfester Werkstoffe, des Plasmaspritzens usw. wurde verzichtet, da hierfür Verfahren angewendet werden, die voll und ganz z. B. der Gießtechnik in der Metallurgie entlehnt sind. Es bestehen keinerlei Beziehungen zur keramiktypischen Formgebung. Die Grundlagen sind völlig andere als die hier behandelten.

Der folgende Teil des Buches geht nun näher auf die maschinentechnische Realisierung der keramischen Formgebungstechnologien ein, wobei ausgewählte Maschinen im Detail erläutert werden.

Spezielle Keramikformgebungsmaschinen

4

4.1. Gießanlagen

4.1.1. Einleitung

Artikel mit komplizierter Geometrie oder hoher Masse, wie Waschtische, Toilettenbecken, Kannen, Vasen, Ofenkacheln mit speziellem Relief usw., werden durch Gießen in Gipsformen mit hoher Abbildungsgenauigkeit von Hand auf Gießbänken und in immer größerem Umfang durch mechanisierte und teilautomatisierte Gießelevatoren, Gießtaktstraßen und Batteriegießanlagen im Voll- und Hohlguß hergestellt. Es sind Anlagen mit automatischem Eingießen des Schlickers, mechanisiertem Transport der Formen, Ausgießen des Restschlickers beim Hohlguß sowie Formlingslederhart- und Formenrücktrocknung bekannt. Bei Anlagen für sanitärkeramische Artikel wird z. T. auch mit steigendem Guß und Restschlickerentleerung über Auslauföffnungen gearbeitet. Bild 4.1 zeigt den schematischen Aufbau einer automatischen Gießbandanlage für WC-Becken.

Die Anlagen arbeiten nach dem herkömmlichen Verfahrensgrundprinzip ohne eine Verkürzung der Formgebungszeit gegenüber dem Standguß und mit manuellen Tätigkeiten von bis zu 80 % des Gesamtarbeitsaufwandes. Die Produktivität derartiger Anlagen liegt in der Geschirrindustrie nach wie vor unter der der Anlagen zur Herstellung von Artikeln durch die Rollerformgebung bzw. die Preßtechnologie.

Die Gießanlagen unterscheiden sich hauptsächlich durch die eingesetzten Transportanlagen und deren Anordnung. Es sind sowohl Anlagen mit *einer* Transportkette für alle Stationen und Funktionen (Bild 4.2) als auch Anlagen mit zwei oder mehreren Transporteinrichtungen, z. B. mit gesondertem Förderer für die gekippten Formen, bekannt.

Mit den Transporteinrichtungen werden die einzelnen oder in Gruppen verspannten Formen bzw. Formenblöcke zu den verschiedenen Stationen taktweise bewegt. Bild 4.3 zeigt eine Anlage, die mit Formenblöcken arbeitet und die durch eine Vielzahl von Transport- und Umsetzeinrichtungen gekennzeichnet ist.

Die Förderer der bekannten Anlagen arbeiten in horizontaler Richtung in einer oder zwei Ebenen, so daß die Anlagen einen relativ großen Flächenbedarf und eine geringe Bauhöhe aufweisen. Bei entsprechender Raumhöhe ist die Anordnung eines Weißtrockners über der Gießanlage möglich. Zur Erhöhung der Erzeugnisqualität wird beim Eingießvorgang und teilweise auch bis zu einer bestimmten Zeit danach bei einigen Anlagen, die für die Herstellung von Porzellanartikeln im Hohlguß eingesetzt werden, die Gipsform in eine langsame Drehbewegung versetzt. Dies ist natürlich bei Anlagen, bei denen mehrere Formen zusammen verspannt sind oder die mit Formenblöcken arbeiten, nicht möglich. Hier kann eine spezielle Schlickerbehandlung unter Vakuum zur Qualitätssteigerung der Erzeugnisse beitragen.

Der Vorteil der Formengruppen ergibt sich aus einer besseren Ausnutzung der Transportkapazität der Anlagen, einem geringen Aufwand für das Verspannen der Formen und entsprechend geringen Handhabungszeiten. Verschiedene Scherbenstärken und die Anpassung an unterschiedliche Massen werden durch die Veränderung des räumlichen Abstandes einer oder mehrerer Gießstationen zur Ausgußstation, der der

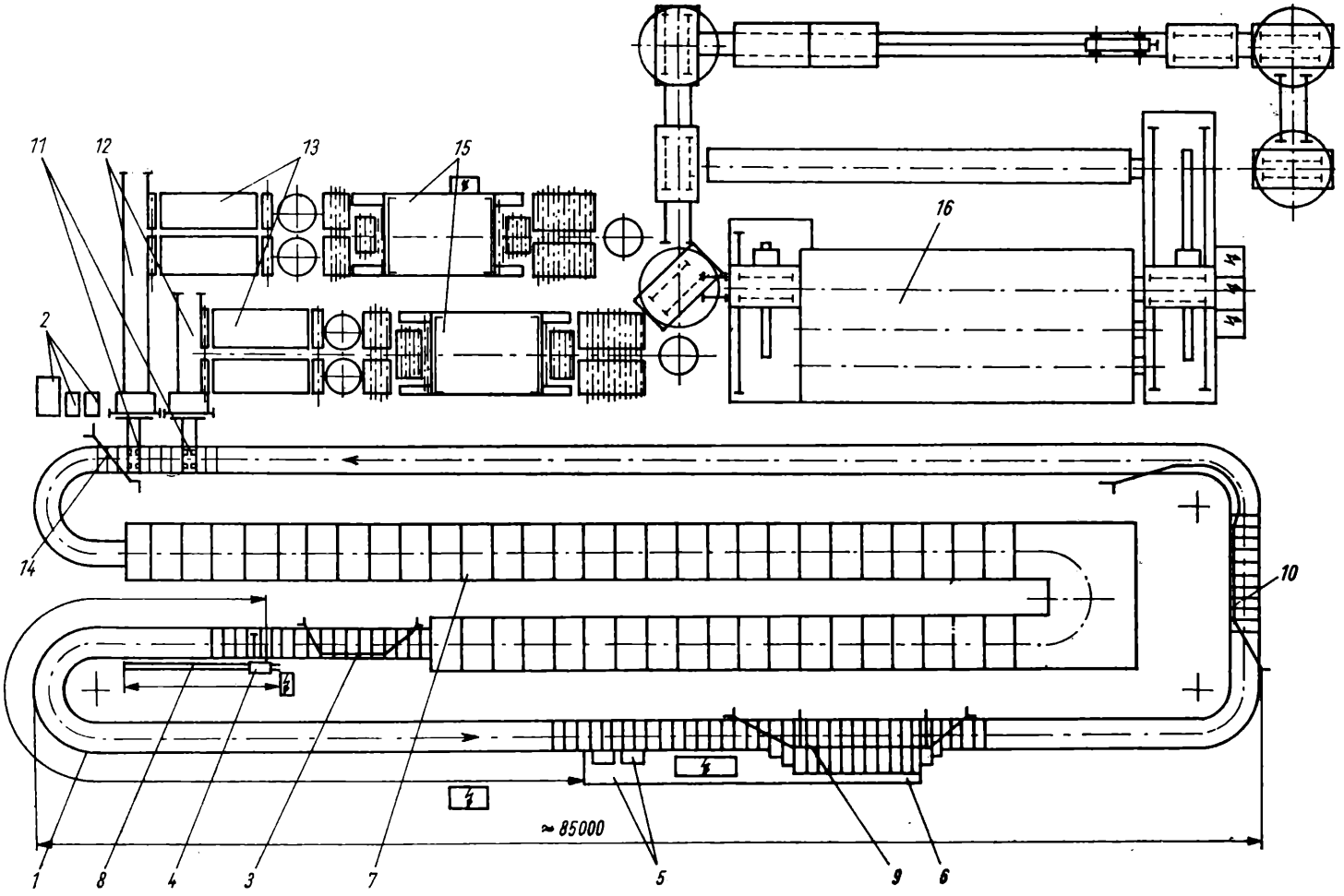


Bild 4.1. Schematischer Aufbau einer Gießtaktstraße für WC-Becken, Leistung 500 Stück/8 h [211]

1 Gießband, *2* hydraulische Schubeinrichtung, *3* räumlich gekrümmte 70°-Kurve für das Heben der Deckel, *4* verschiebbare Gießmaschine, *5* Stopfenziehvorrichtung senkrecht und waagerecht, *6* Ablaufrinne, *7* Formenrücktrocknung, *8* Standzeitkorrektur, *9* Kippkurve 80°, *10* Deckelabnehmer, *11* automatische Entformungsmaschine, *12* Rollenbahn, *13* Lederhartförderer, *14* Deckelschließkurve, *15* Lederharttrockner, *16* Weißtrockner

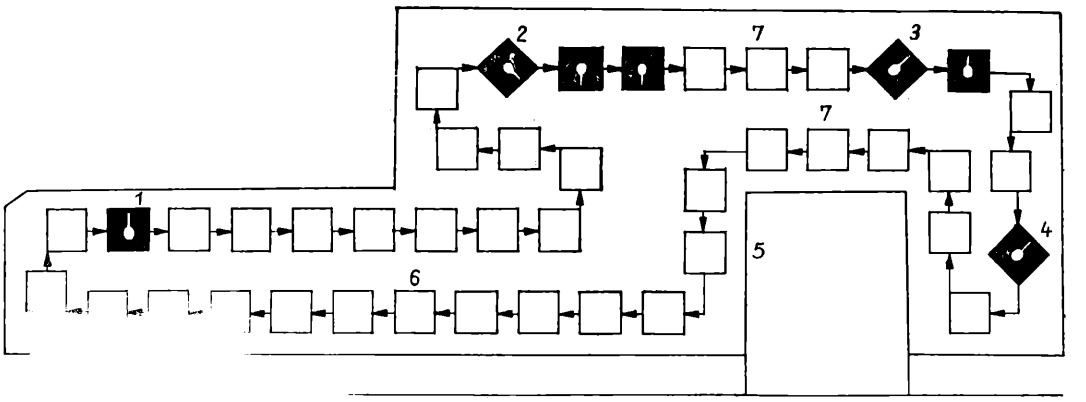


Bild 4.2. Schematische Darstellung einer Gießanlage mit einer Transportkette für alle Stationen und Funktionen [212]

1 Eingießen, *2* Ausgießen, *3* Drehen, *4* Schneiden der Scherben, *5* Ausnehmen, *6* Formentrocknung, *7* Formlingstrocknung

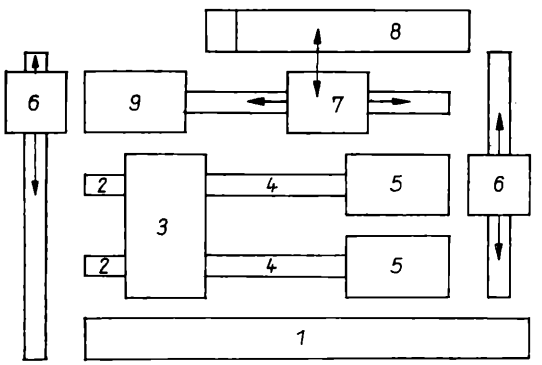


Bild 4.3. Übersicht über eine Gießstraße für Bodenvasen [213]

1 Gipsformenlager, *2* Vorratsplatz, *3* Formenrücktrockner, *4* Eingießstation und Zeit für die Scherbenbildung, *5* Auskippstation, *6/7* Schiebebühnen, *8* Lederharttrockner, *9* Entformungsstation

jeweiligen Scherbenbildungszeit (s. Abschnitt 3.1.2.3.) in Abhängigkeit von der Takt- bzw. Laufzeit des Förderes entspricht, realisiert. Dabei wird sowohl mit ortsfesten Ein- als auch ortsfesten Ausgußstationen gearbeitet. Bei mehreren variablen Ein- bzw. Ausgußstationen, die jeweils einem Formensatz zugeordnet werden, sind Artikel mit unterschiedlichen Scherbenstärken gleichzeitig auf einer Anlage produzierbar.

Viele Anlagen arbeiten mit einer konstanten Transportkapazität für die Formen, d. h., unabhängig von der Artikel- bzw. Formengröße befindet sich eine gleiche Anzahl von Formen im Einsatz. Bei einigen Anlagen ist es so, daß sich aufgrund einer höheren Packungsdichte auf der Transportanlage bei kleineren Artikeln und Formen die Formenanzahl erhöhen kann.

Zum Entfernen des Restschlickers nach Ablauf der Scherbenbildung sind an allen Anlagen spezielle Vorrichtungen vorhanden, die manuell betätigt werden oder in den automatischen Ablauf der Anlage eingeschlossen sind. Bei den für die Geschirrkeramik bekannten Anlagen wird das Entfernen des Restschlickers fast ausschließlich durch das Kippen der Form realisiert. Die Form verbleibt dabei so lange in Kippstellung, bis die nicht verfestigte Masse restlos ausgelaufen und der Scherben abgestumpft ist. Nach einer Zeit der Trocknung können sich dann Folgearbeiten, wie das Entfernen des Deckstücks und das Beschneiden der Falze anschließen.

Nach weiterer Trocknung der Artikel bis zur Lederhartfeuchte werden die Formen manuell geöffnet, die Artikel aus der Form entnommen, verputzt, wenn nötig garniert und in den Weißtrockner eingesetzt. Die leeren und gereinigten Formenteile werden wieder zusammengesetzt und durchlaufen, bis sie zur Eingießstation gelangen, eine Formenrücktrocknungsstrecke.

Neben den Anlagen, die nach dem herkömmlichen Verfahrensprinzip arbeiten, sind in den letzten Jahren auch Anlagen produktionswirksam geworden, die durch neue Verfahren mit kürzeren Scherbenbildungs- oder Abstumpfzei-

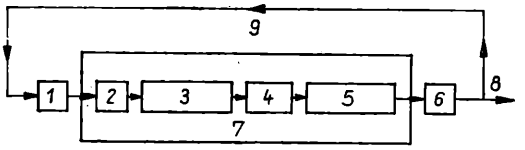


Bild 4.4. Schema einer Gießtaktstraße ohne Formenrücktrocknung [214]

1 Zusammensetzen der Form, *2* Eingießen des Schlickers, *3* Scherbenbildung, *4* Ausgießen des überschüssigen Schlickers, *5* Lederharttrocknung der Formlinge, *6* Auseinandernehmen der Formen und Herausnehmen der Formlinge, *7* gemeinsamer Trockenschrank, *8* zur Retusche und zum Formlingstrockner, *9* Rückweg der Formen

ten sowie ohne Formenrücktrocknung arbeiten.

Bild 4.4 zeigt das Schema einer Gießtaktstraße, die mit Gipsformen von etwa 10 mm Wandstärke arbeitet, die schon während der Scherbenbildung trocknen, und bei der deshalb auf eine Formenrücktrocknung verzichtet werden kann. Durch die Erhöhung der treibenden Kräfte für den Entzug des Wassers aus dem Gießschlicker und für die Partikelkoagulation durch Druck und/oder Vakuum, den elektrophoretischen Guß sowie durch erhöhte Schlickertemperatur wird die Scherbenbildung beschleunigt. Bild 4.10, S. 135, zeigt die Druckgußanlage DG 160 der Firma Dorst für die Herstellung von Waschtischen. Die Anlage zeichnet sich besonders durch einen gegenüber der herkömmlichen Technologie bedeutend verringerten Platzbedarf aus.

4.1.2. Gießlinie für Kleinteile GK 80

Die halbautomatische Fertigungslinie GK 80 zur Herstellung von feinkeramischen Erzeugnissen bis 0,35 l Gießinhalt, wie Kannen- und Zuckerdosendeckel, Milchkännchen, Dosen usw., wurde auf der Grundlage einer Lizenz aus der ČSSR im VEB Thuringia Sonneberg, Kombinat für Glas- und Keramikmaschinenbau (KGKM), entwickelt. Durch die Fertigungslinie werden die Arbeitsgänge Formentransport, Einguß, Schlikkerüberschußentleerung, Lederhart- und Formenrücktrocknung automatisch ausgeführt. Das Gießgut wird manuell entnommen (Bild 4.5).

Die Gießlinie ist zweietagig aufgebaut, wobei sich auf der oberen Bahn die Eingußstation, die Wendevorrichtung, der Lederharttrockner und die Entnahmestation befinden. Auf der unteren Bahn erfolgt eine intensive Formenrücktrocknung. Die Paletten (Bild 4.6), auf denen sich jeweils zwei Arbeitsformen befinden, werden durch Hubroste, eine spezielle Vorrichtung im Wendebereich, und durch Aufzüge an den Enden der Anlage taktweise transportiert.

Der Einguß des Schlickers erfolgt über zwei pneumatisch gesteuerte Gießventile bei gleichzeitiger Rotation der Formen. Da der Schlicker drucklos in die Formen eingebracht werden muß, ist eine direkte Einspeisung aus unter Druck stehenden betrieblichen Fördereinrichtungen nicht möglich. Der Schlicker wird daher in einem über den Gießstationen angebrachten Behälter automatisch vordosiert. Die Dosierung der Eingußmenge erfolgt mittels Füllstandselektroden und kann darüber hinaus über Zeitrelais begrenzt werden. Mit zwei Drosseln ist es möglich, die Gießgeschwindigkeit entsprechend den technologischen Erfordernissen zu gestalten.

Auf der Gießlinie können verschiedene Artikel gleichzeitig hergestellt werden, wenn die Scherbenbildungszeit der Artikel und die Formenhöhe gleich sind. Unterschiedliche Scherbenstärken werden durch die örtliche Veränderung der Einguß- zur Ausgußstation erreicht. Der Ausguß des Überschußschlickers wird durch eine spezielle Wendevorrichtung realisiert, auf die die mit Formen besetzten Paletten vom Hubrost übergesetzt, verspannt und um 140° in die Ausgußstellung gedreht werden. Danach durchlaufen die Formen, mit der Öffnung senkrecht nach unten hängend, weitere 10 Takte und werden dann in die Ausgangsstellung zurückgedreht, entspannt und auf den hinteren Rost übergeben. Durch den Hubrost erfolgt der Weitertransport zur Entnahmestation.

An das Abtropfen des Restschlickers in der Wendevorrichtung und auf dem Weg zur Entnahmestation schließt sich die Lederharttrocknung durch gezielte Warmluftbeaufschlagung der Artikel über Düsen an. Die Beheizung des Lederhart- und Formenrücktrockners kann mit Dampf, Heißwasser oder Ofenkühlluft erfolgen. Durch eine entsprechende wärmetechnische Auslegung ist es möglich, mit der Fertigungslinie im Dreischicht-Betrieb zu produzieren.

An der Entnahmestation werden die Formen manuell geöffnet, die lederharten Artikel ent-

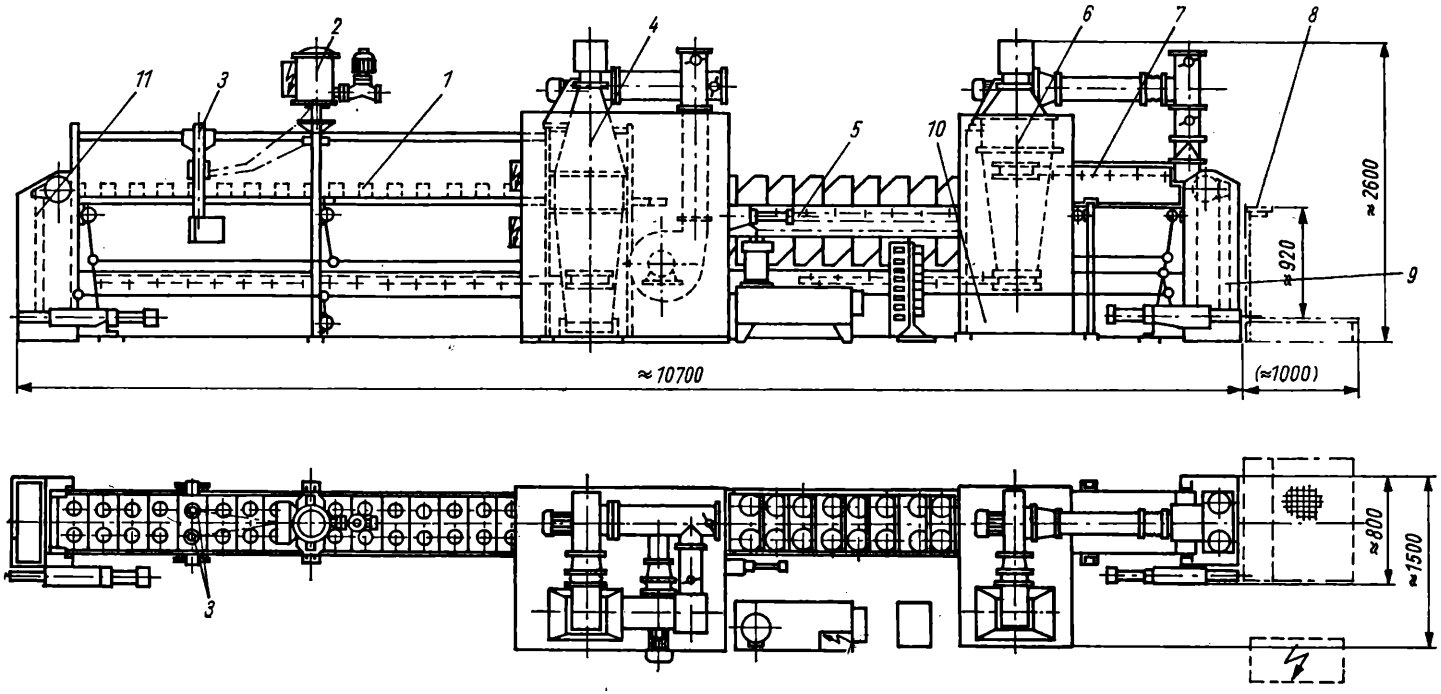


Bild 4.5. Gesamtdarstellung der Gießlinie für Kleinteile des VEB Thuringia Sonneberg [215]

1 vorderer Rost, *2* Vordosierung, *3* Eingießstation (verschiebbar), *4* Düsentrockner 1, *5* mechanisch-hydraulische Wendevorrichtung, *6* Düsentrockner 2, *7* hinterer Rost, *8* Entnahmestation, *9* Senkbühne, *10* Formenrücktrocknung, *11* Hebebühne

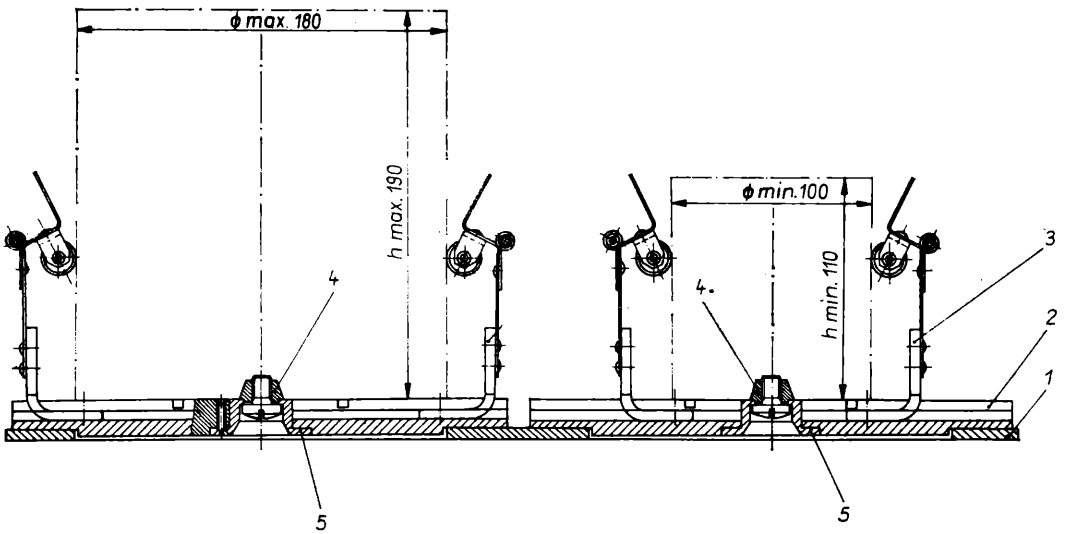


Bild 4.6. Transportpalette der Gießlinie GK 80 [215]

1 Platte mit Mitnehmerbohrungen für den Hubrost, *2* Spannscheibe, *3* verstellbare Spannstütze, *4* Zentrierbuchse für Gipsform, *5* Buchse zur Zentrierung der Spannscheibe in der Wendevorrichtung und beim Einguß

nommen, die Formen nach der Reinigung wieder zusammengesetzt und auf den Paletten befestigt. Durch eine Senkbühne bewegen sich die Paletten zur unteren Etage. Während des Transportes zur gegenüberliegenden Hebebühne erfolgt die Formenrücktrocknung. Der Aufzug hebt die Paletten wieder in die obere Etage.
Damit ist ein vollständiger Formenumlauf abgeschlossen. Die hauptsächlichen Bewegungen der Gießlinie sind hydraulisch gesteuert. Alle mechanisch, elektrisch, hydraulisch und pneumatisch gesteuerten Bewegungen werden durch eine kombinierte Folge- und Ablaufsteuerung zuverlässig koordiniert. Die Steuerung des zeitlichen Ablaufs übernimmt ein Programmzeitgeber. Die Kontakte der Hilfsrelais und des Programmzeitgebers wirken direkt auf die Schaltschütze zur Ansteuerung der Wegeventile. Alle Schaltelemente und Sicherungsstromkreise für die Elektromotoren und Transformatoren sind im Elektroschrank untergebracht.
Die Gießlinie kann zur Anpassung an die Platzverhältnisse in den Porzellanwerken mit verschiedenen Weißtrocknern komplettiert werden. Varianten zur Aufstellung der Gießlinie GK 80 und des Weißtrockners bei unterschiedlichen Platzverhältnissen zeigt Bild 4.7. Die technischen Daten der Gießlinie für Kleinteile sind aus Tabelle 4.1 zu entnehmen.

Tabelle 4.1. Technische Daten der Gießlinie für Kleinteile GK 80 [215]

Leistung	max. 200 Stück/h
Taktzeit	45 s
Scherbenbildungszeit	4...18 min
Formenanzahl	80 Stück
max. Formengröße	∅ 180 mm, Höhe 190 mm
min. Formengröße	∅ 100 mm, Höhe 110 mm
Gießlochdurchmesser	30...110 mm
Elektrischer Anschlußwert	etwa 8,6 kW
Wärmebedarf	84 MJ h^{-1}
Heizmittel	wahlweise Dampf, Heißwasser oder Ofenkühlluft
Länge	10700 mm
Breite	1500 mm
Höhe	2600 mm

4.1.3. Fertigungslinie für Hohlware G 114

Die Gießmaschine G 114 der Fa. Maschinen- und Stahlbau Julius Lippert GmbH [216] dient zur Herstellung von lederhart getrockneten Hohl-

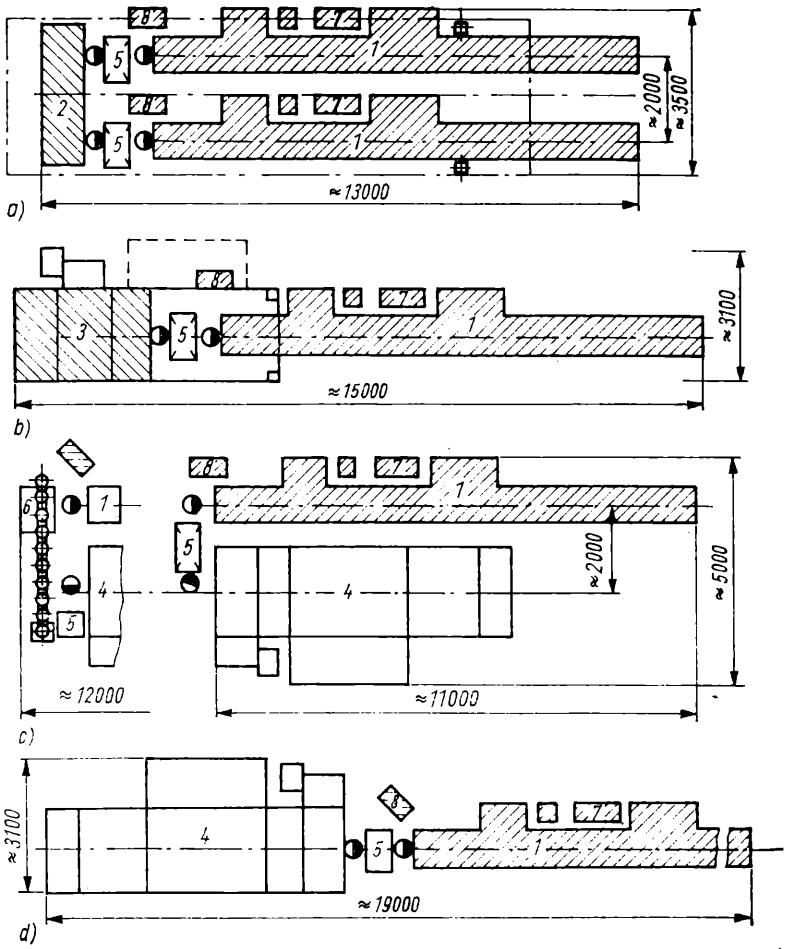


Bild 4.7. Varianten *a*) bis *d*) der Aufstellung der Gießlinie GK 80 und des Weißtrockners [215]

1 Gießlinie GK 80, *2* Weißtrockner, *3* Kleinschaukeltrockner FT 1, *4* Kleinschaukeltrockner FT 0, *5* Arbeitstisch, *6* Transportkettenband, *7* Hydraulikschrank, *8* Elektroschaltschrank

gußartikeln mit und ohne Relief, wie Kannen, Terrinen, Vasen u. ä. Mit der Maschine wird durch eine Bedienperson eine Leistung von max. 150 Stück/h im zusammenhängenden 2-Schicht-Betrieb ohne Formenwechsel erreicht. In der 3. Schicht erfolgt die automatische Formenrücktrocknung.

Die Fertigungslinie, s. Bild 4.8, besteht aus zwei horizontal umlaufenden Transportbändern, wobei das Außenband (*5*) mit 104 drehbaren Scheiben und das Innenband (*6*) mit 61 bis zu einem Winkel von 26° verstellbaren Aufsetzgabeln bestückt ist. Am *Außenband* sind die einzelnen Fertigungsstationen mit den dafür benötigten Vorrichtungen und die Formenrücktrocknungsstrecke (*1*) angeordnet. Auf dem *Innenband* erfolgt die Verfestigung bzw. Lederharttrocknung (*7*) der Artikel in der Form. Der Restschlicker wird beim Umsetzen der Formen vom Außen- auf das Innenband entleert (*3*).

Die Teilung der Bänder beträgt 400 mm. Auf der Linie können Formen von 150 bis 380 mm Durchmesser und mit einer Höhe von 180 bis 450 mm eingesetzt werden. Die Linie ist jedoch auch – je nach zu fertigendem Sortiment – mit einer Teilung der Transportanlage von 320 oder 500 mm lieferbar.

Entsprechend der maximal möglichen Anzahl von drei Eingießstationen (*4*) können Artikel mit bis zu drei verschiedenen Standzeiten gleichzeitig produziert werden. Dabei ist es möglich, sowohl das Außenband abwechselnd mit den je-

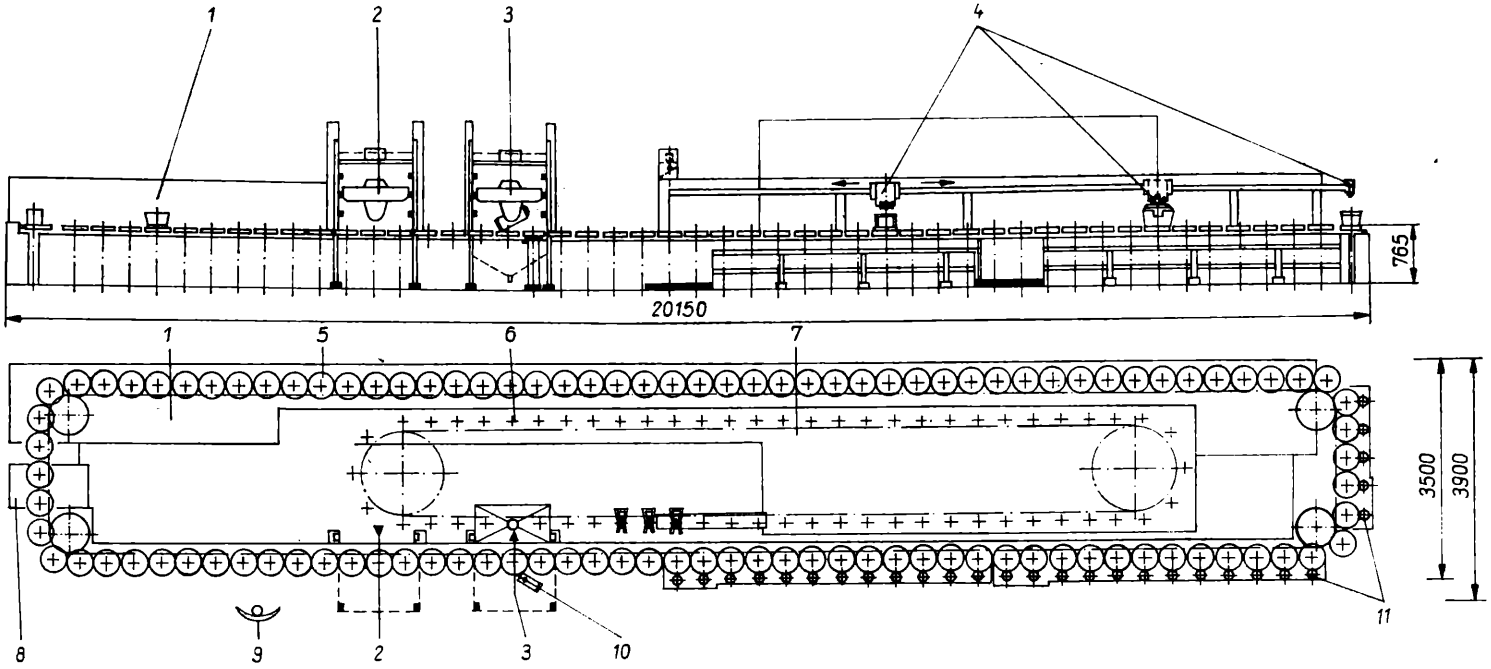


Bild 4.8. Prinzipdarstellung der Gießlinie G 114 [216]

1 Formenrücktrockner, *2* Rückstellstation, *3* Restschlickerentleerung, *4* Eingießstation, *5* Außenband, *6* Innenband, *7* Lederharttrockner, *8* Formenzentriervorrichtung, *9* Entformung, *10* Formenarretierung, *11* Spindelantriebe

weiligen Formen zu besetzen als auch die Formen der Artikel mit gleicher Standzeit hintereinander anzuordnen. Die erste Form der jeweiligen Reihe, die durch reflektierende Stoffe örtlich definiert gekennzeichnet ist, wird automatisch erkannt und an der entsprechenden Eingießstation mit Schlicker gefüllt. Die Steuerung der Anlage ermöglicht es auch, eine Gießstation zum Eingießen und eine zweite zum Nachgießen, z. B. für Kerngußartikel, einzusetzen.

Zur Erreichung der artikelspezifischen Scherbenbildungszeit sind die Gießstationen entlang der Transporteinrichtung verschiebbar angeordnet. Der Eingießvorgang beginnt mit dem Einfahren von zwei Meßsonden in den Öffnungsrand der Form. Die Höhenabtastung der Form erfolgt dabei berührungslos. Zur Vermeidung von Luftblasen und anderen Fehlern ist es möglich, sowohl zu Beginn als auch vor Ende des Gießvorganges mit verringertem Schlickerstrom zu gießen. Bild 4.9 zeigt eine Eingießstation mit Elektroden zur Gießmengenregelung. Das teilweise Öffnen des Gießschlauches (*4*) erfolgt durch das Ziehen eines Schiebekeils (*1*) aus einer Führung zwischen dem Exzenter (*2*) und der Rolle des Schließhebels (*3*). Nach einer vorwählbaren Zeit wird dann der zweite Schiebekeil ebenfalls nach oben bewegt, so daß die volle Öffnung des Gießschlauches freigegeben wird. Der Schlicker strömt bei dieser Stellung so lange in die Form ein, bis die untere Elektrode (*6*) erreicht wird. Der von der Elektrode ausgehende Impuls bewirkt das Einfahren des einen Schiebekeils und damit das Schließen des Gießschlauches um die Hälfte, so daß der Schlicker nur noch vermindert in die Form strömt. Ist die erforderliche Füllstandshöhe erreicht, wird über die obere Elektrode (*5*) der zweite Schiebekeil eingefahren und so der Gießschlauch durch den Schließhebel völlig geschlossen.

Während des Eingießens kann die Form entweder stillstehen, gedreht oder gerüttelt werden. Das gilt auch für die weiteren Takte bis zur Formenarretierung (Position (*10*) auf Bild 4.8). Um ein störungsfreies Arbeiten der Restschlickerentleerungstation (*3*) und ein Ausgießen der Formen über Schnaupe oder Henkel zu gewährleisten, wird die jeweilige Form in einer definierten Stellung an der Arretiervorrichtung gestoppt. Dazu sind die Formen mit einer optischen Markierung versehen, die ebenfalls automatisch erkannt wird. Das Ausgießen des Restschlickers erfolgt mit dem Umsetzen der Formen vom Außen- auf das Innenband. Bei einer Leistung von 150 Stück/h beträgt die Auskippzeit 3,5 s. Die Formen werden auf das Innenband mit der Öffnung nach unten aufgesetzt. Um eine Tropfenbildung am Boden der Formlinge zu vermeiden, können die Formen nach dem Absetzen im Abtropfbereich schräggestellt werden.

Das Innenband bewegt sich taktweise entgegen dem Uhrzeigersinn und transportiert die Formen vom Abtropfbereich durch den Lederharttrockner (*8*) zur Rückstellstation (*2*). Der Lederharttrockner gewährleistet, daß die Artikel mit der gewünschten Feuchtigkeit zur Weiterbearbeitung bereitgestellt werden, wobei das Besatzsortiment der jeweils gewählten Trocknerein-

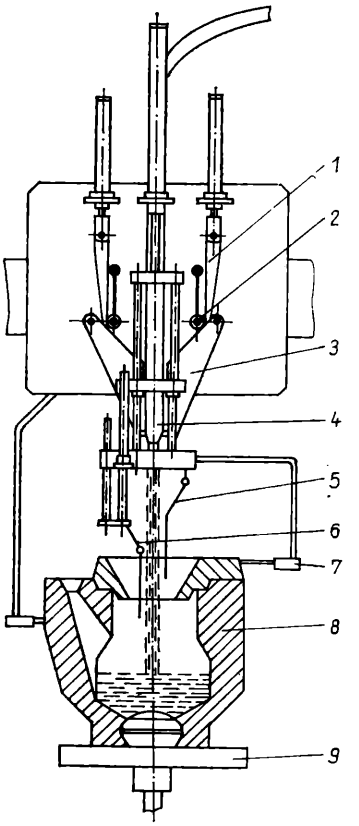


Bild 4.9. Gießstation der Gießlinie G 114 [217]

1 Schiebekeil, *2* Exzenter, *3* Schließhebel mit Rolle, *4* Gießschlauch, *5* obere Elektrode, *6* untere Elektrode, *7* Lichtschranke, *8* Form, *9* Drehteller

stellung in seiner Zusammensetzung angepaßt wird.

Durch die Rückstellstation, die in ihrem Aufbau der Restschlickerentleerstation entspricht, werden die Formen vom Innenband abgenommen, um 180° gedreht und wieder auf das Außenband aufgesetzt. Das Außenband transportiert die Formen in den Entformbereich (*10*). Das Ausnehmen der Artikel erfolgt manuell. Die entleerten Formen werden gereinigt, wieder verspannt und durch den Formenrücktrockner (*5*) gefördert. Vor und nach dem Düsentrockner werden die Formen durch Zentriervorrichtungen (*9*) auf den drehbaren Aufnahmescheiben ausgerichtet. Der Formenrücktrockner ist wärme- und trocknungstechnisch so ausgelegt, daß mit der Anlage ein durchgängiger 2-Schicht-Betrieb möglich ist.

Tabelle 4.2 zeigt einige technische Daten der Fertigungslinie.

Tabelle 4.2. Technische Daten der Gießlinie für Hohlgeschirr G 114 [216]

Leistung	max. 150 Stück/h
Taktzeit	24 s
Anzugszeit	2,0...13,6 (20) min
Lederharttrocknung	15,2 min unter Düsen
Formenrücktrocknung	18,0 min unter Düsen
Außenband	104 Drehteller
Innenband	61 Gabeln, starr oder beweglich
Formenanzahl	156 Stück
Teilung	400 mm
max. Formengröße	∅ 380 mm, einschließlich Spannbügel, Höhe 450 mm
min. Formengröße	Breite 150 mm, Höhe 180 mm
Wärmebedarf	max. 850000 kJ h^{-1}
Luftbedarf	150 l min^{-1}, 6 bar
Elektrischer Anschlußwert	etwa 15 kW
Gesamtlänge	20150 mm
Gesamtbreite	3900 mm
max. Höhe	2870 mm

4.1.4. Halbautomatische Druckgußanlage DG 160

Die Druckgußanlage der Fa. Dorst-Maschinen- und Anlagenbau, Kochel am See [218], dient der Herstellung von Hohl- und Kerngguß-Sanitärartikeln im lederharten und putzfertigen Zustand.

Die Leistung der Anlage beträgt je nach Größe des zu fertigenden Artikels 6 bis 10 Stück/h. Die maximale Größe der zweiteiligen Form beläuft sich auf 1100 mm × 1250 mm. Die Formentiefe muß mindestens 400 mm betragen. Mit der Anlage sind Artikel mit einem Rohmaß von 810 mm × 660 mm herstellbar. Die Druckgußform aus einem Plastwerkstoff mit einer definierten, offenen Porenstruktur und einer – gegenüber Gips – hohen mechanischen Festigkeit (s. Abschnitt 3.1.4.1.) ermöglicht die effektive Umsetzung des an sich bekannten Druckgußverfahrens in die keramische Produktionspraxis. Der automatische Ablauf des Formgebungsprozesses garantiert, daß bei konstanten Daten des Schlickers, der Glasur und des Brandes die geformten Artikel hohen Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit der Abmessungen, Masse, Aussehen und Qualität genügen.

Eine Besonderheit der Anlage, s. Bild 4.10, besteht darin, daß der Schlicker in einem geschlossenen Kreislauf umgepumpt wird, somit frei von Verunreinigungen ist und bei der Fertigung von Hohlgußteilen unmittelbar für den nächsten Guß verwendet werden kann. Es ist keinerlei Rücklauf des Schlickers zwecks Reinigung, Rückverdünnung oder Korrektur erforderlich.

Zur Hohlraumnachverfestigung von Gießartikeln mit zusammenhängendem Hohlraum ist die Anlage mit einer entsprechenden Druckluft-einrichtung für max. 15 bar ausgerüstet. Die Schlickerentleerung des Hohlgußraums erfolgt mit Druckluft von max. 6 bar. Für die Schlickerförderung (*3*) sowie zum Aufbau und Halten des Schlickerdruckes von max. 25 bar wird eine hydraulisch betriebene Doppelmembranpumpe mit einer Förderleistung von 4 l/Hub eingesetzt.

Zum Schließen, Halten und Öffnen der Form kommt eine liegende hydraulische Zweisäulenpresse (*2*) mit einer Schließkraft von max. 1600 kN und einem möglichen Hub von 790 mm zum Einsatz. Sämtliche Traversen der Presse sind aus Sphäroguß gefertigt. Die beiden Aufspannplatten für die Formenhälften, die mit T-Nuten versehen sind, bestehen aus Silumin. In den Preßzylinder ist ein Eilgangzylinder zum Erreichen hoher Schließgeschwindigkeiten integriert. Das Hydraulikaggegrat (*4*) besteht aus

≈ 2550
2180
1800
1100
450
Formtiefe min. 400
Hub max. 790
Schlickerleitung
590 x 770
ϕ 18
550

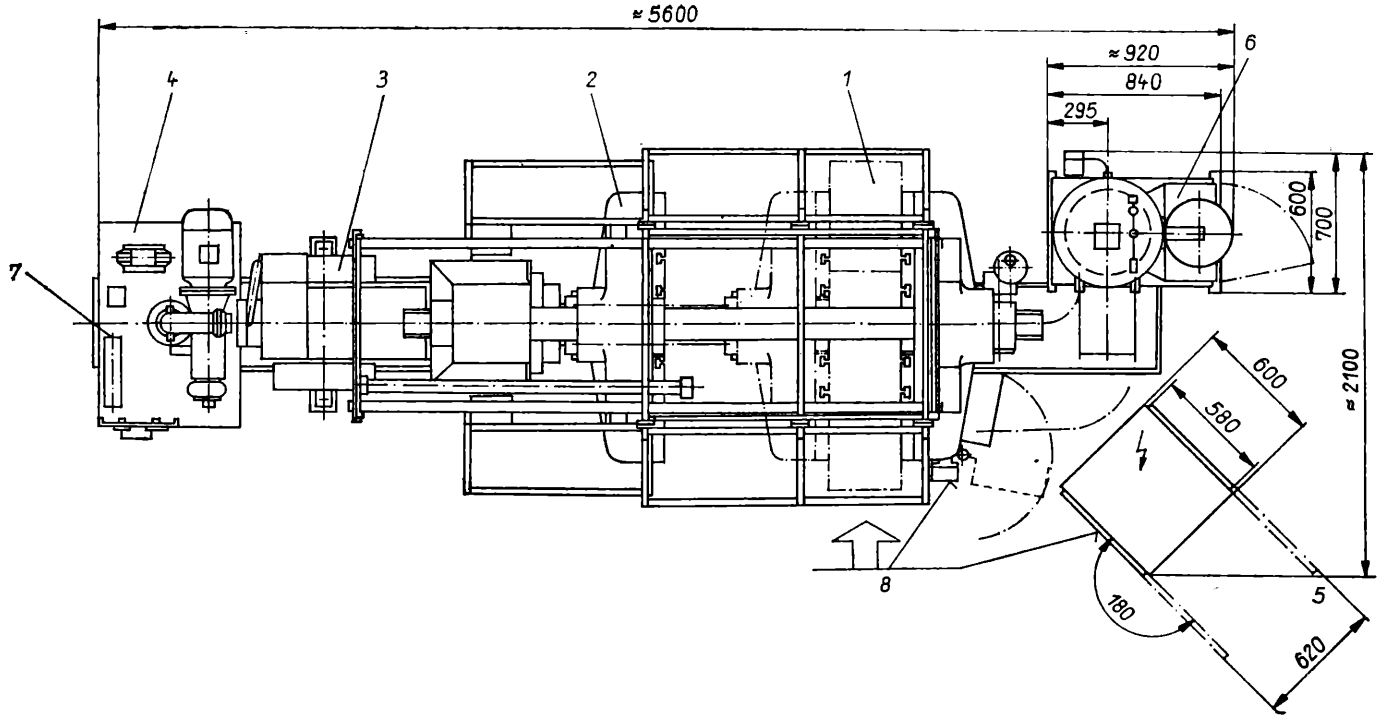
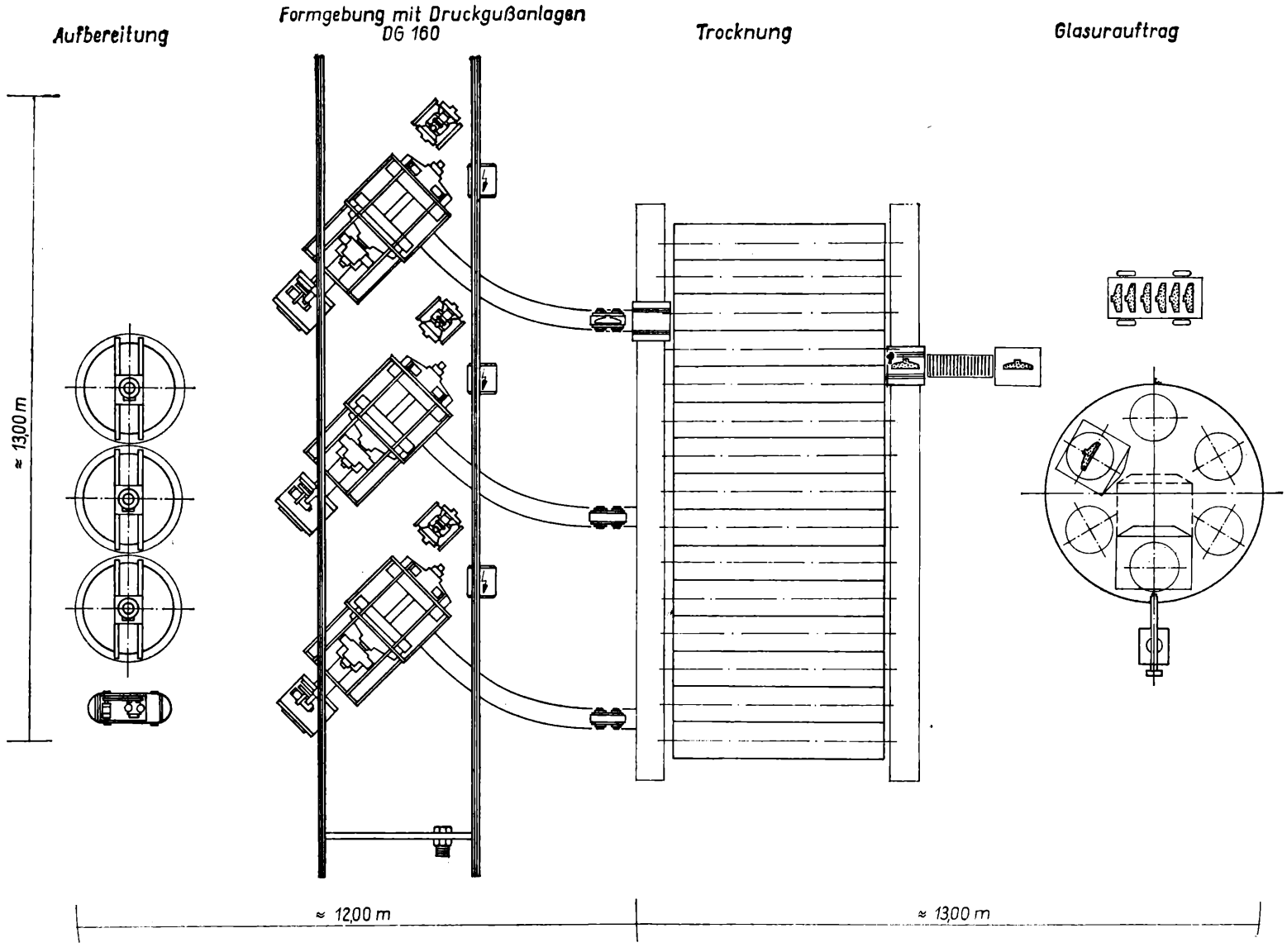


Bild 4.10. Schematische Darstellung der Druckgußanlage DG 160 [218]

1 Poröse Kunststoffform, *2* Hydraulische Presse, *3* Schlickerförderaggregat, *4* Hydraulikaggregat, *5* Schaltschrank, *6* Schlickerheizung, *7* Kühlwasserzulauf, *8* Bedienseite


Aufbereitung
Formgebung mit Druckgußanlagen
DG 160
Trocknung
Glasurauftrag
≈ 13,00 m
≈ 12,00 m
≈ 13,00 m

einer Niederdruck-Regelpumpe und einer separaten Hochdruckpumpe mit einer Leistung von 7,2 l min^{-1} bei 300 bar.
Zur Steuerung des Preßzylinders und der hydraulisch betriebenen Schlickerpumpe werden Proportionalventile eingesetzt. Der Arbeitsablauf der Anlage läßt sich ohne spezifische Fachkenntnisse über Kreuzschienenverteiler programmieren. Digitale und analoge Anzeigen für die Steuerung der Presse und der Schlickerpumpe ermöglichen bei Formenwechsel eine präzise Reproduktion der formspezifischen Einstellungen.
Die Umrüstzeiten für den Wechsel der Form (*1*) liegen zwischen 2 bis 3 Stunden. Dadurch ist es möglich, problemlos auf die Anforderungen des Marktes, selbst wenn es sich um geringe Stückzahlen handelt, zu reagieren.
Für die Leistungssteigerung durch eine weitere Verkürzung der Scherbenbildungszeit ist die Anlage mit einer Schlickerheizung (*6*) mit einem Anschlußwert von 18 kW ausgerüstet (zur Bedeutung der Schlickertemperatur s. Abschnitt 3.1.2.3.). Mit dieser Zusatzeinrichtung ist es möglich, geeigneten Schlicker bis auf 40 °C zu erwärmen. Als Wärmeträger dient Wasser, das zur Vergleichmäßigung der Temperaturverteilung im Wärmetauscher ständig umgewälzt wird. Dabei wird die Wassertemperatur thermostatisch geregelt.
Die Restfeuchte der mit der Druckgußanlage hergestellten Artikel liegt etwa 2 % unter der durch konventionelles Gießen hergestellten Rohlinge und ermöglicht so eine gute Handhabung bei der Entformung. Zur Absaugung des Restwassers aus den beiden Formenhälften und zum Halten des Artikels beim Öffnen der Presse an einer Formenhälfte ist die Anlage mit einer Vakuumpumpe und entsprechenden Steuerventilen ausgerüstet. Während der Formling auf der einen Seite durch Vakuum gehalten wird, wird er von der anderen Formenhälfte durch Druck, der auf ein aus Filtrationswasser gebildetes Wasserpolster wirkt, abgelöst. Hat der Preßzylinder eine Endstellung erreicht, wird zum Abnehmen des Formlings das Vakuum wieder ab- und auch an dieser Formenhälfte ein Druck aufgebaut.
Um die Güte der Formlinge zu verbessern und deren rasche und störungsfreie Entformung zu ermöglichen, wird in [219] vorgeschlagen, in den Formenrückseiten über die gesamte Formenfläche verteilt in regelmäßigen Abständen von – je nach Modell – 1 bis 2 cm Bohrungen anzubringen, die bis zu einem Zentimeter an die Formenoberfläche heranreichen. Dadurch erreicht man einen für den Lösevorgang nötigen ausgeglichenen, pneumatisch oder hydraulisch erzeugten Druck über der gesamten geometrisch unregelmäßigen Formenoberfläche.
Wie mehrere Druckgußanlagen DG 160 in einer Fertigungseinheit zusammenwirken können, zeigt Bild 4.11. Tabelle 4.3 enthält die Zusammenstellung einiger technischer Daten.

Tabelle 4.3. Technische Daten der halbautomatischen Druckgußanlage DG 160 [218]

Leistung je nach Größe	6...10 Stück/h
max. Artikelgröße (Rohmaß)	810 mm × 660 mm
Schließkraft	max. 1600 kN
Schlickerdruck	max. 25 bar
Anschlüsse	
Strom	etwa 11 kW (ohne Heizung)
Druckluft	etwa 6 bar, 100 l min^{-1} etwa 15 bar, 100 l min^{-1}
Wasser	etwa 4 bar, 50 l min^{-1}
Nettogewicht je Anlage	etwa 12000 kg

◀ Bild 4.11. Fertigungseinheit mit mehreren Druckgußanlagen DG 160 [218]

4.2. Maschinen und Anlagen zur bildsamen Formgebung keramischer Massen

4.2.1. Strangpressen

4.2.1.1. Vorbemerkungen

Wie in Abschnitt 3.2.3.1. bereits beschrieben, kommen Schnecken-, Walzen-, Kolben- und Scheibenpressen zum Einsatz. Aufgrund ihrer

Vorteile, wie

- kontinuierlicher Strangvortrieb,
- Verarbeitung von Massen unterschiedlicher Konsistenz,
- Erhöhung der Homogenität der Masse u. a.,

haben Schneckenpressen die größte Verbreitung gefunden. Es sind Ein- (Bild 4.36), Zwei- (Bild 3.24) und Dreischneckenpressen in Horizontal- und Vertikalbauweise (s. Bild 4.12) im Einsatz. Der in Bild 4.12 dargestellte Stufen-Preßzylinder beeinflußt den Rückstau und ermöglicht einen hohen Preßdruck. Die Zweischneckenpresse mit oberer Vorpresse und unterer achsparalleler oder um 90° gedrehter Strangpresse ist die verbreitetste Bauart. Die Schneckenpressen werden für die Weich-, Halbsteif-, Steif- und Heißverpressung eingesetzt. Mit diesen Maschinen ist bei entsprechender Auslegung die Herstellung von Strangdurchmessern bis zu 2000 mm möglich.

Die Schnecken bestehen aus Flügelnaben, die auf Profilwellen aufgezogen werden. Sie sind als Schweißkonstruktion ausgeführt oder werden bei kleinen Schneckendurchmessern aus einem Rohling gedreht. Zur Erhöhung der Standzeit werden die Schnecken gehärtet oder mit Verschleißbelägen besetzt.

Um das Mitdrehen der Masse in den Zylindern zu vermeiden, sind deren Innenseiten mit geraden oder gedrallten Stegen versehen, mit gelochten Einsätzen belegt oder mit Beton ausgekleidet. Weiterhin werden zu diesem Zweck Gegenmesser in Form von Stäben eingesetzt. Bei richtiger Anordnung der Gegenmesser kann die Austrittsgeschwindigkeit des Stranges im Vergleich zu Pressen ohne Gegenmesser erhöht und der spezifische Energieverbrauch gesenkt werden. Dabei besitzt auch die Querschnittsform (rund, drei- oder viereckig) der Messer Bedeutung.

Je nach Einsatzgebiet und Verwendungszweck der Pressen sind diese mit oder ohne Vakuumkammer ausgerüstet. Je größer die spezifische Oberfläche der Masse und je höher das Vakuum in der Vakuumkammer ist (zur Begrenzung des Vakuums s. Abschnitt 3.2.3.4.), um so besser wird die Masse entlüftet. Zur Erhöhung der spezifischen Oberfläche wird die Masse z. B. bei Zweischneckenpressen am Ende der Zuführschnecke bzw. Mischerschnecke durch Schlitz- (s. Bild 3.24), Loch- oder Stabplatten gedrückt

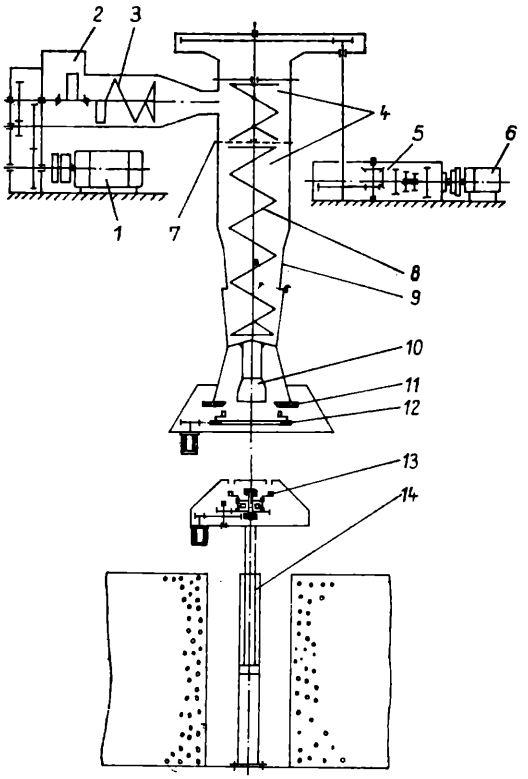


Bild 4.12. Vertikales Vakuumaggregat [222]

1 Antrieb Zuführschnecke, *2* Einschüttrumpf, *3* Zuführschnecke, *4* Vakuumkammern, *5* Verstellgetriebe, *6* Antrieb Preßschnecke, *7* Schlitzplatte, *8* Preßschnecke, *9* Stufenzylinder, *10* Kern, *11* Mundstück, *12* Spitzenrillierung mit Schneidscheibe, *13* Muffenrillierung, *14* hydraulischer Abnahmetisch

oder durch Frässchnecken bzw. Schnitzelmesser zerkleinert. Das Vakuum wird in vielen Fällen durch Flüssigkeitsringpumpen, aber auch durch Rotations- und Kolbenpumpen erzeugt. Ist für das Betreiben der Pumpen Kühlwasser notwendig, sollte dessen Temperatur nicht über 15 °C liegen. Während man in der Geschirr- und Elektrokeramik hauptsächlich Zweischneckenpressen einsetzt, sind die Maschinen in der Grobkeramik, die auch Vakuumaggregate oder Vakumate genannt werden, mit einem Ein- oder Zweiwellenmischer als Zuführ- und Mischeinrichtung ausgerüstet. Zur kontinuierlichen Füllung der Schnecken sind über diesen im allgemeinen ein oder zwei Einräumerwalzen bzw. Haspeln angeordnet.

Auf die Problematik der Texturen, die bei der

Strangformgebung entstehen, wurde bereits in Abschnitt 3.2.3.6. ausführlich eingegangen. An dieser Stelle sollen nur einige maschinentechnische Konsequenzen erläutert werden. Die geometrische Gestaltung der Preßschnecke bestimmt weitgehend die Ausbildung der sog. »Schnecken«- oder »S«-Texturen [220]. Wichtige Parameter hierbei sind der Nabendurchmesser sowie die Steigung der Schnecke über ihrer Länge. Gleichfalls große Bedeutung besitzen die Gestaltung des Preßkopfes und des Mundstücks. Der Preßkopf dient der Vergleichmäßigung des Strangvortriebes und sollte deshalb nicht zu kurz gewählt werden. Zur symmetrischen Ausbildung des Druckes über dem Preßkopfquerschnitt ist es sinnvoll, eingängige Schnecken mit einem zwei- oder mehrflügligen Endmesser auszurüsten (s. Abschnitt 3.2.3.6.). Um »Schnitt«-Texturen zu vermeiden, sollte sich die Nabe des Endmessers kontinuierlich so weit wie möglich verjüngen.

Zur Beseitigung der in stranggepreßten Erzeugnissen vorhandenen Texturen wurde in der Vergangenheit versucht, Texturzerstörer einzusetzen [225]. Diese Vorrichtungen haben jedoch – trotz teilweise erheblichen technischen Aufwandes – nicht zu entscheidenden Verbesserungen der Erzeugnisqualität geführt. Zur Zeit wird verstärkt daran gearbeitet, die internen Störquellen, die bei Vakuumaggregaten und Strangpressen in der Produktion auftreten, durch Gegenmaßnahmen zu eliminieren und dadurch allen Anforderungen einer modernen automatischen Produktion in immer größerem Maße gerecht zu werden [224].

Besonders bei grobkeramischen Erzeugnissen, die durch das Strangpreßverfahren meist ihre endgültige Querschnittsform erhalten, ist die Ausbildung des Preßkopf/Mundstück-Systems von außerordentlicher Bedeutung. In [226] werden Berechnungsmethoden für die Gestaltung des Preßkopfes vorgestellt. Die Berechnung und der Ausdruck der Ergebnisse können über einen Computer erfolgen. Bild 4.13 zeigt die Höhenlinien des Preßkopfes für ein bestimmtes Format. In der Verjüngung vom runden Preßkopfeintritt bis zum rechteckigen kleineren Preßkopfaustritt wird an den Schmalseiten das Material stärker abgebremst als in der Mitte der Längsseiten. Um die voreilende Mitte zu verlangsamen, muß der Preßkopf dort starke Einbuchtungen

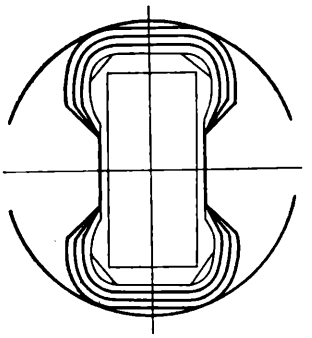


Bild 4.13. Höhenlinien eines Preßkopfes [221]

bekommen, so daß sich bezüglich der Höhenlinien die typische »Hundeknochenform« ergibt.

Über die Gestaltung von Mundstücken wird u. a. in [226] berichtet. Für magere, wenig bildsame Massen sollen die Mundstücke lang und fast zylindrisch sein. Für plastische Tone können sie kürzer und konisch ausgeführt werden. Bei mageren Massen und der Steifverpressung hat es sich als sinnvoll erwiesen, das Mundstück zu bewässern bzw. zu beölen.

Zur Herstellung von Hohlsträngen bringt man im Mundstück Kerne aus verschleißfestem Material an. Die Kerne (*4*) sind durch Kernhalter (*1*) am Kernhalterbügel (*2*) befestigt (Bild 4.14). Zur Vermeidung von sogenannten Bügelrissen muß ein Mindestabstand zwischen den Einbauten und dem Mundstückaustritt eingehalten werden. Zur qualitätsgerechten Fertigung ist das Mundstück besonders bei großformatigen Hohlsträngen so zu gestalten, daß der Widerstand über dem Mundstückquerschnitt möglichst gleich ist. Bild 4.15 zeigt eine Zusammenstellung verschiedener Querschnittselemente, aus denen fast jeder beliebige Strangquerschnitt zusammengesetzt werden kann.

Bild 4.16 gibt den Widerstandsbeiwert als Funktion der Mundstückkonizität α und der relativen Mundstücklänge L/D für das Querschnittselement Nr. *1* aus Bild 4.15 an. Aus dem Diagramm läßt sich ablesen, daß konische Mundstücke mit großer Länge kurzen, zylindrischen Mundstücken im Hinblick auf den Widerstand gleichwertig sind. Mit zunehmender Konizität ist jedoch eine Erhöhung der Strangrauhigkeit zu erwarten. Die Veränderung der Länge der Kerne und der Winkel ist eine Möglichkeit,

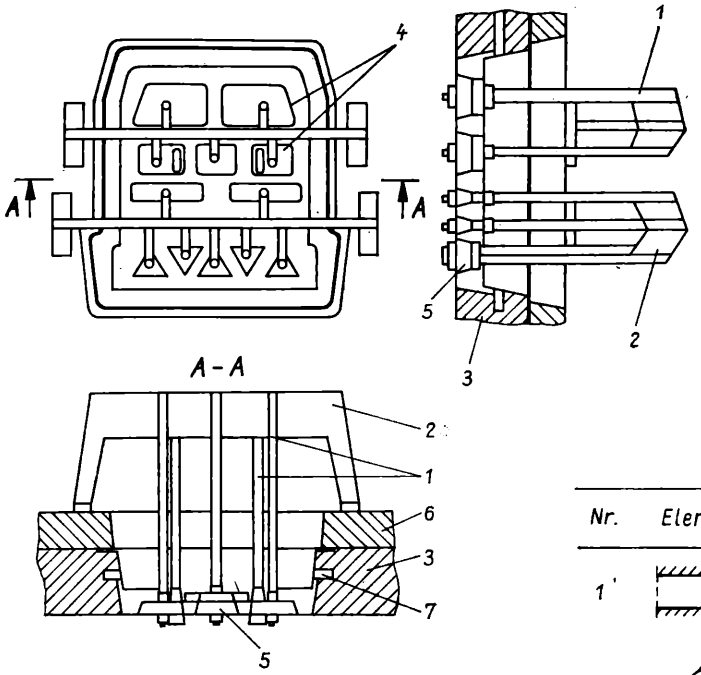


Bild 4.14. Mundstückeinbauten für Außenwandziegel (vereinfacht aus [11])

1 Kernhalter, *2* Kernhalterbügel, *3* Mundstückplatte, *4* Kerne, *5* Kernhalterung, *6* Druckplatte, *7* Wasserkanal

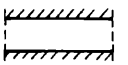
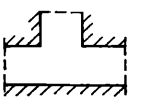
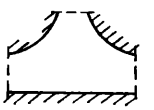
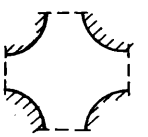
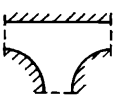
Nr.	Element	O/F	f
1		$2\,{}^{L}/_{D}$	1
2		$4\,{}^{L}/_{D}$	0,1
3		$3\,{}^{L}/_{D}$	0,288
4		$2{,}88\,{}^{L}/_{D}$	0,273
5		$1{,}75\,{}^{L}/_{D}$	1,44
6		$1{,}6\,{}^{L}/_{D}$	1,53
7		$1{,}37\,{}^{L}/_{D}$	2,1
8		$1{,}93\,{}^{L}/_{D}$	0,9

Bild 4.15. Zusammenstellung verschiedener Querschnittselemente zur Herstellung von Hohlsträngen [226]

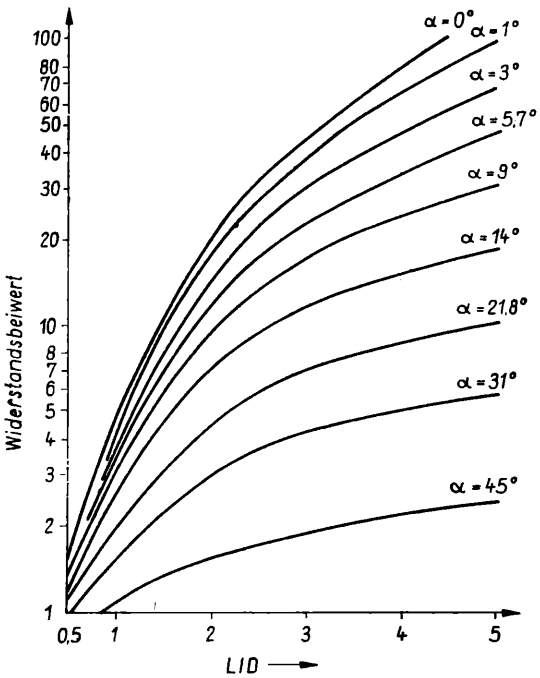


Bild 4.16. Widerstandsbeiwert als Funktion der Mundstückkonizität [226]

den Widerstand in den einzelnen Mundstückbereichen zu beeinflussen. Weitere Varianten bestehen im Verschieben des Mundstücks gegenüber dem Preßkopf in allen drei Raumebenen oder durch den Einbau von Bremsen (Stäben oder Platten im Inneren des Mundstücks) [223]. Die Mundstücke werden aus Stahl, Leichtmetall, Plast- oder Keramikmaterial gefertigt. Dabei sind Toleranzen im Bereich von $\pm 0{,}1$ bis 0,2 mm einzuhalten.

Unmittelbar an die Presse schließt sich als erste Nachfolgeeinrichtung der Abschneider an. Durch die Abschneideranlage wird der endlose Voll- oder Hohlstrang in die gewünschte Länge zerteilt. Der Arbeitstakt des Abschneiders wird durch die Stranggeschwindigkeit oder durch Fotozellen gesteuert. Während in der Elektro- und Geschirrindustrie Bügelabschneider mit Schneiddraht oder aus Stahlblech eingesetzt

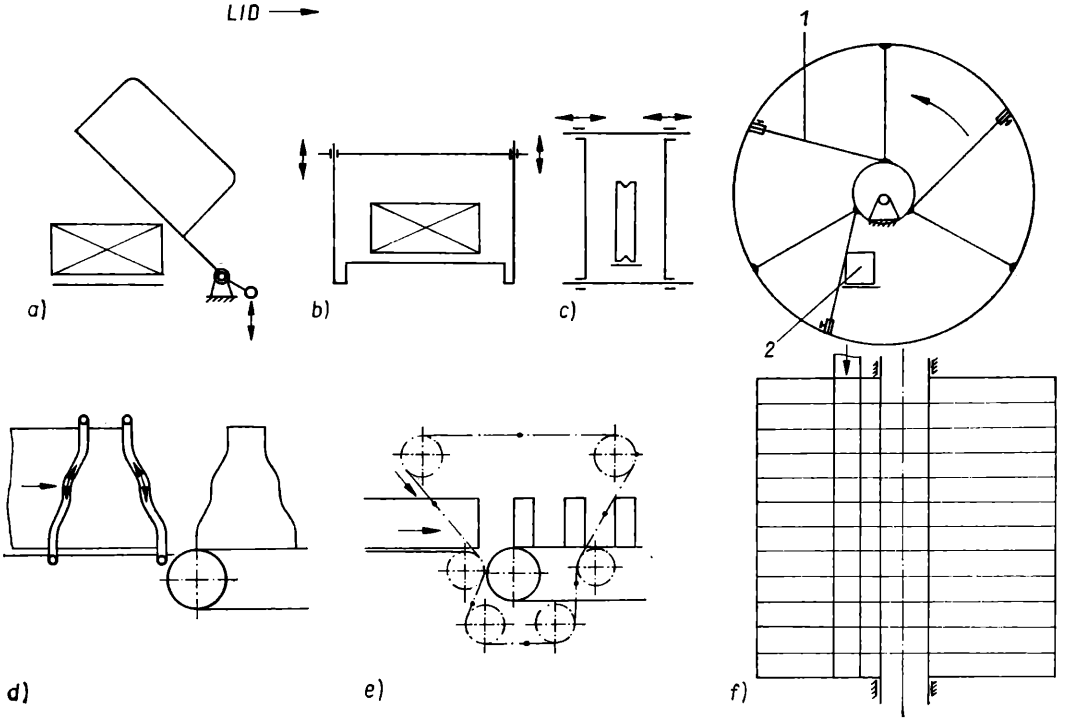


Bild 4.17. Schneiddrahtanordnungen [133]

a) und *b*) Bügelschnitt, *c*) Zwickerschnitt, *d*) Fassonschnitt, *e*) Umlaufschnitt, *f*) Harfenschnitt
1 Schneiddraht, *2* Formling

Tabelle 4.4. Abschneideverfahren [133]

Verfahren	Maschine	Anwendung
Einzelschnitt		
Bügelschnitt	Bügelabschneider mit bogenförmiger oder gerader Schneiddrahtbewegung	Voll- und Hohlziegel, Drainrohre, Kabelabdeckhauben, Nachpreßformlinge (Kacheln, Kanalsteine, Dachziegel), Hohl- und Vollhubel, Profilstränge
Zwickerschnitt	Abschneider mit Zwickerschnitt	Spaltplatten, stranggepreßte Kacheln, Formlinge mit gratfreiem Schnitt
Umlaufschnitt	Umlaufabschneider	Voll- und Hohlziegel, Drainrohre, Kabelabdeckhauben, Nachpreßformlinge
Kolonnenschnitt		
Fassonschnitt (auch Einzelschnitt möglich)	Dachziegelabschneider, Abschneider für Gerad- und Kurvenschnitt	Voll- und Hohlziegel, Drainrohre, Kabelabdeckhauben, Dachziegel, Nachpreßformlinge, Hourdis, großformatige Wand- und Deckenziegel
Harfenschnitt	Kolonnenabschneider	Voll- und Hohlziegel, Drainrohre, Kabelabdeckhauben, Nachpreßformlinge

werden, sind für die grobkeramischen Erzeugnisse eine Vielzahl von Abschneidertypen bekannt geworden (Bild 4.17 und Tabelle 4.4) [133].

In modernen Ziegelwerken werden jetzt vor allem Mehrdraht-Segment-Abschneider eingesetzt. Dieser Abschneidertyp garantiert eine hohe Leistung und eine Schnittgenauigkeit, die für die zuverlässige Funktion der nachfolgenden Ausrüstungen notwendig ist. Mit dem Mehrdraht-Segment-Abschneider werden je nach Ausführung mehrere Ziegel (z. B. 20 NF) gleichzeitig aus einem Strangstück geschnitten. Das Strangstück wird durch eine Eindraht-Schneidevorrichtung mit einer Überlänge von etwa 30 mm erzeugt. Der am Mehrdraht-Segment-Abschneider anfallende Kantenabfall wird durch entsprechende Fördermittel zurück zum Vakuumaggregat gebracht.

Es sind auch Mehrdraht-Segment-Abschneider bekannt geworden, durch die gleichzeitig zwei oder mehrere nebeneinanderliegende Strangstücke zerschnitten werden.

In den letzten Jahren ist es auch gelungen, die Einsatzgebiete der Strangpressen in Verbindung mit Zusatzeinrichtungen zu erweitern. Beispiele dafür sind die Flachstanztechnologie, mit der Wand- und Bodenplatten aus einem flach gezogenen Band geschnitten und geprägt werden, und die maschinelle Produktion von Glasschmelzhäfen in Verbindung mit einer hydraulischen Presse (Bild 4.18).

Einen Überblick über die für Vakuumaggregate bekannten Überwachungs-, Kontroll- und Sondereinrichtungen enthält [141]. Über die Problematik der Regelung und Steuerung der Anlagen mit dem Ziel der Erreichung einer optimalen Stranggeschwindigkeit wird in [229] berichtet. Bild 4.19 zeigt das Regelschema von Stranggeschwindigkeit und Beschicker.

4.2.1.2. Vakuumpresse PVP 75

Die Vakuumpresse vom Typ PVP 75 ist die größte Maschine der Typenreihe »Vakuumpressen PVP« des VEB Kema Görlitz, Betrieb des Kombinates Thuringia Sonneberg, für die Geschirr- und Elektrokeramikindustrie (Bild 4.20) [222, 230]. Die Typenreihe umfaßt z. Z. horizontale Zweischneckenpressen in sieben Baugrößen. Mit den Maschinen können aufbereitete Porzellanmassen mit einem Feuchtegehalt von 18,5 bis 26 % verarbeitet werden. Die Presse PVP 75 mit einem Preßzylinderdurchmesser von 750 mm wird für die Herstellung von einsträngigen Voll- und Hohlhubeln in der elektrokeramischen Industrie eingesetzt. Die Presse ist für eine max. Durchsatzleistung von 20 t h^{-1} ausgelegt. Die in der Praxis erreichbaren Lei-

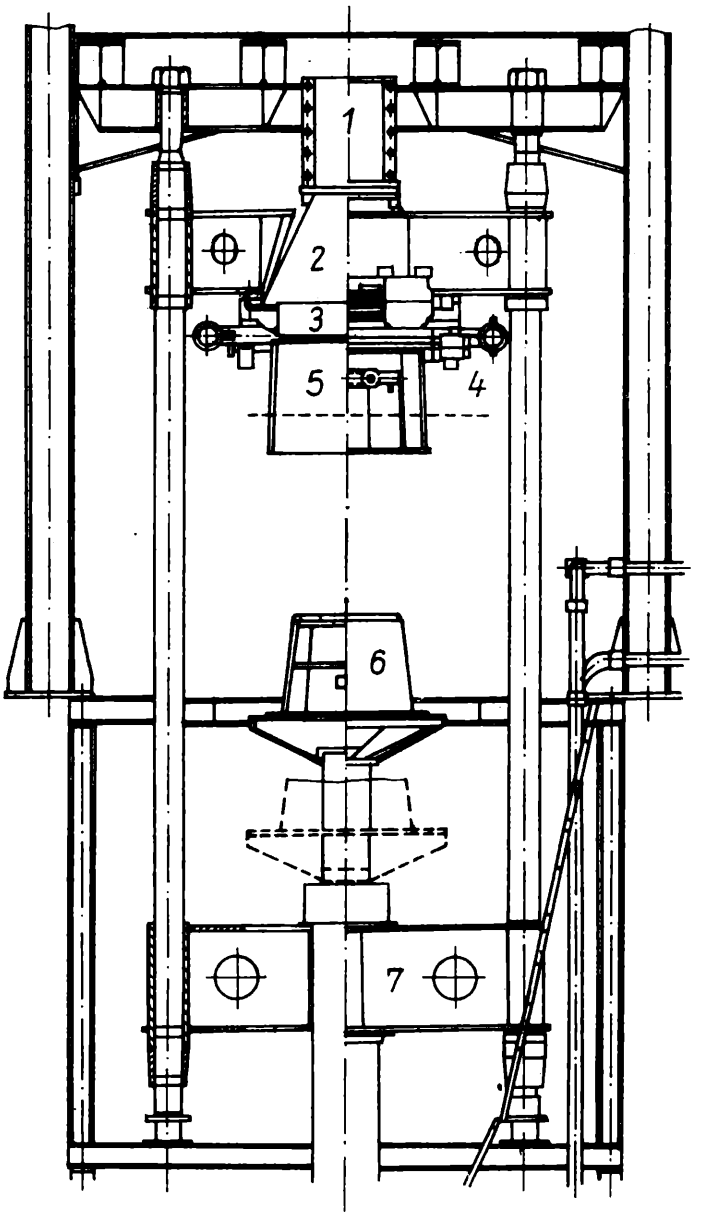


Bild 4.18. Vorrichtung zum Pressen von Glasschmelzhäfen [227]

1 Nachpreßzylinder der Strangpresse, *2* Glocke, *3* Mundstück, *4* Abschneider, *5* Außenform, *6* Innenform, *7* Pressentisch

stungen sind vom Strangdurchmesser, dem Feuchtegehalt und der Zusammensetzung der keramischen Masse abhängig.

Die Entwicklung der PVP 75 und der Typen PVP 25, PVP 35 und PVP 50 erfolgte auf der Grundlage eines einheitlichen Konstruktionsentwurfs. Tabelle 4.5 gibt einige technische Daten dieser Maschinen wieder. Der Strangquerschnitt (bei den Pressen PVP 25 und PVP 35 sind auch Mehrfachmundstücke möglich) und die Durchsatzleistung sind wichtige Kriterien bei der Auswahl einer Presse. In Tabelle 4.6 sind weitere technische Parameter der Presse PVP 75 angegeben.

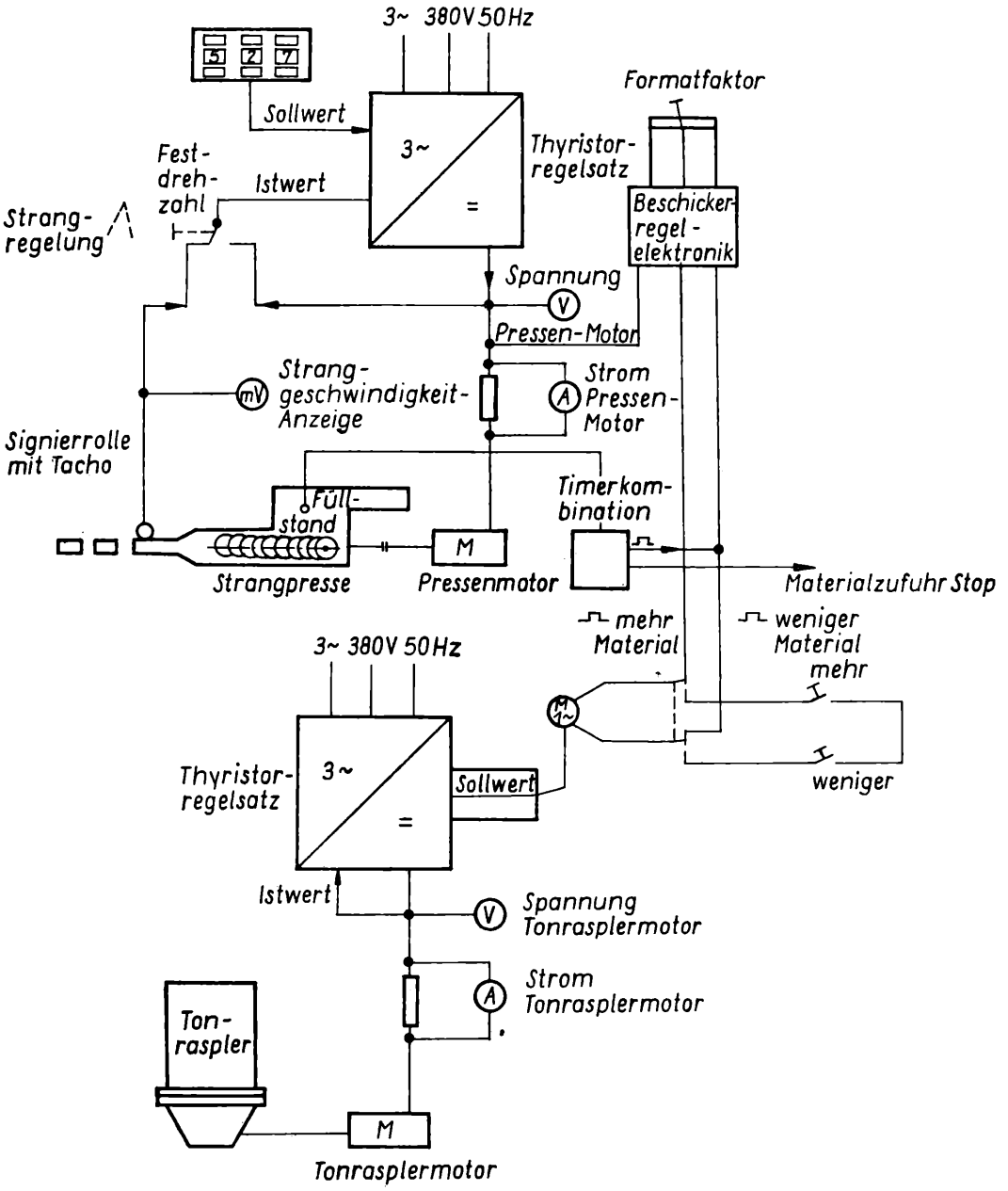


Bild 4.19. Regelschema für Stranggeschwindigkeit und Beschicker [229]

Tabelle 4.5. Technische Daten der Vakuumstrangpressen PVP 25; 35; 50 und 75 [222]

	PVP 25	PVP 35	PVP 50	PVP 75
Preßzylinderdurchmesser, mm	250	350	500	750
Hubeldurchmesser, min., mm	90	200	200	300
Hubeldurchmesser, einsträngig, max., mm	220	320	350	500
Strangquerschnitt, min., cm^2	65	315	315	700
Durchsatzleistung, t h^{-1}	8,0	13,0	14,0	20,0
Antriebsleistung, kW	25,5	57,5	57,5	95,0
Masse, t	3,20	6,48	8,00	12,00

Tabelle 4.6. Weitere technische Daten der Vakuumstrangpresse PVP 75 [222]

Installierte elektrische Leistung	
Presse, kW	55
Zuführer, kW	30
Vakuumpumpe, kW	10
Drehzahl der Zuführschnecke, min^{-1}	7; 9; 14
Drehzahl der Preßschnecke, min^{-1}	6; 9; 13
Strangquerschnitt, max., cm^2	2000
Strangdurchmesser Hohlhubel, außen, mm	630
Vakuum, kPa	8...3
Länge, mm	8200
Breite, mm	2000
Höhe, mm	2600

Die Pressen besitzen sowohl für die oben liegende Zuführ- als auch für die Preßschnecke einen eigenen Antrieb, der jeweils mit einem Schaltgetriebe für drei Drehzahlen ausgerüstet ist. Mittels elektromagnetischer Kupplungen können die Zuführschnecke und die Preßschnecke getrennt voneinander ein- und ausgeschaltet werden. Die Getriebe sind getrennt vom Pressenrumpf angeordnet, so daß eine Erwärmung des Pressengehäuses durch die Getriebewärme vermieden wird.

Durch den Einsatz von schrägverzahnten, einsatzgehärteten und geschliffenen Zahnrädern wird eine hohe Betriebssicherheit erreicht.

Für die mit der keramischen Masse in Berührung kommenden Bauteile werden je nach Einsatzfall folgende Ausführungen gefertigt:

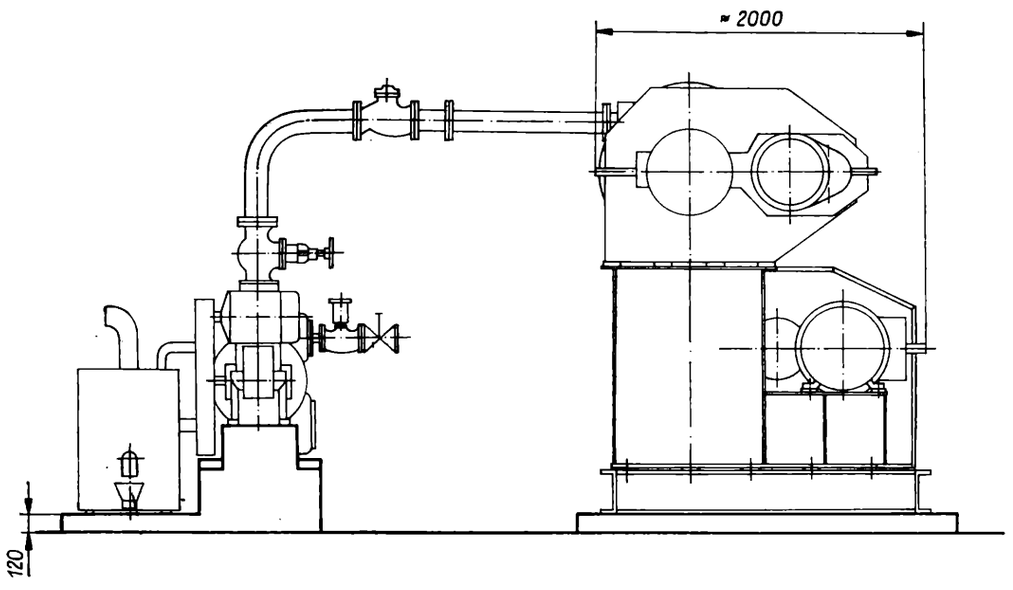
- Normalausführung PVP, nicht rostfreie Presse,
- rostgeschützte Ausführung PVPu, rostfreie Ausführung außer Trog und Rumpf, Trog und Rumpf aus Grauguß mit Epoxidharz beschichtet,
- rostfreie Ausführung PVP/S, rostfreie Presse.

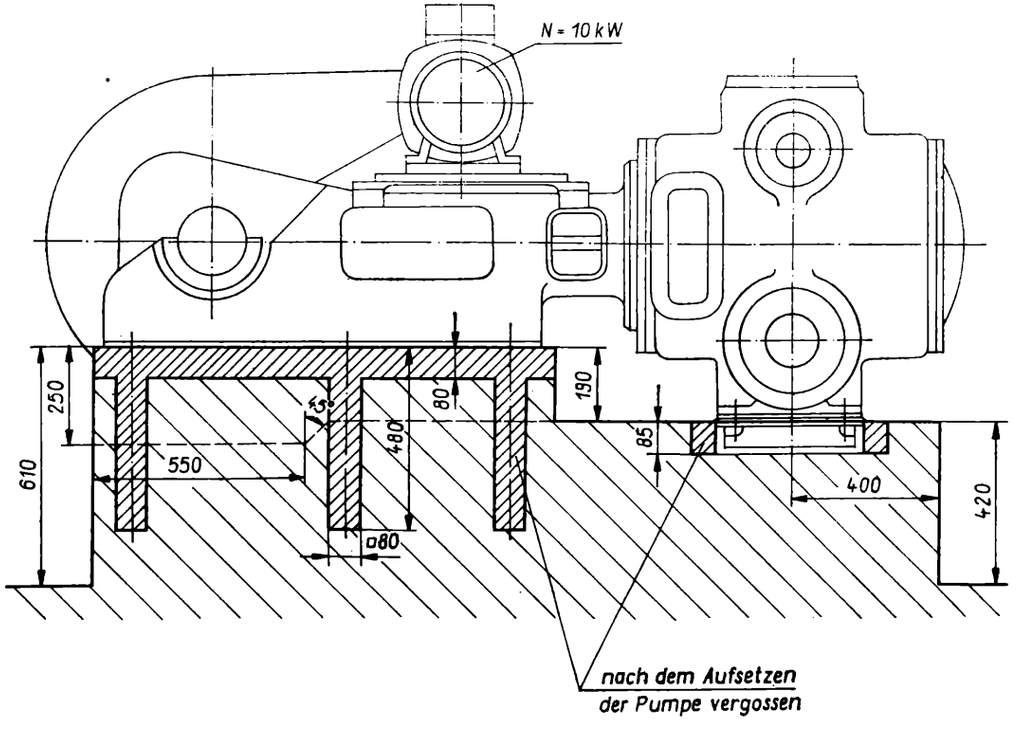
Als weitere Ausführung gibt es die Pressen PVP/S1. Mit diesen drehzahlreduzierten Varianten wird speziell für die Elektrokeramik eine hohe Verpressung bei geringerem Durchsatz realisiert. Bei den Pressen PVP 25/S1, PVP 35/S1, PVP 50 und PVP 75 kommen einteilige Preßzylinder in rostfreier Ausführung mit einem Kühlsystem zum Einsatz. Die PVP 25 und PVP 35 werden mit Klappzylindern gefertigt.

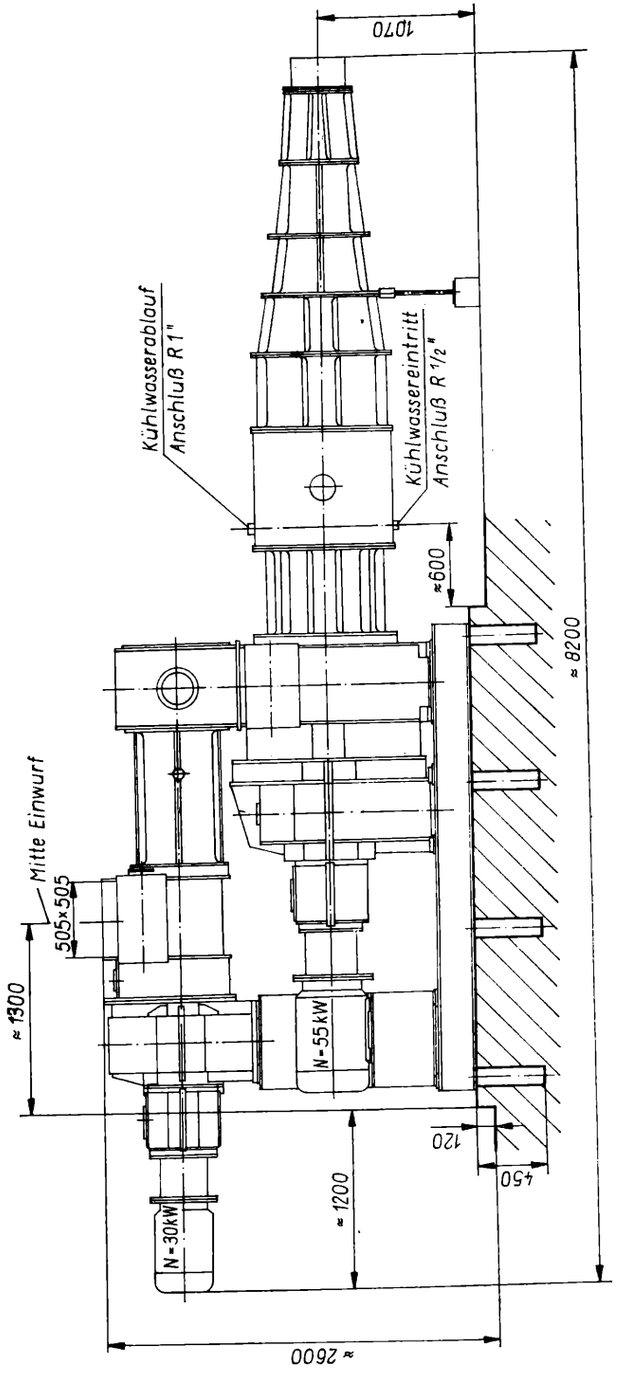
Zum zwangsweisen Masseeinzug in die Zuführ- und Preßschnecke sind die Pressen mit jeweils zwei gegenläufigen Einräumern ausgerüstet. Die aus einem Plastwerkstoff gefertigten spiralförmigen Einräumer garantieren durch einen hohen Masseeinzug einen optimalen Füllgrad der Schnecken und damit eine gute Vortriebsleistung der Pressen. Durch eine verschleißfeste Beschichtung der Plastteile erreichen diese Einräumer die dreifache Standzeit von Stahlgußerzeugnissen. Bild 4.21 zeigt die Anordnung der Einräumer am Trog einer Presse.

Entsprechend dem Einsatzgebiet der Pressen werden Schnecken mit oder ohne Belag eingesetzt. Bei den Pressentypen PVP 50 und PVP 75 kommen grundsätzlich rostfreie, belaglose Schnecken zum Einsatz. In Verbindung mit einer abgestimmten Schneckengeometrie trägt ein dreiflügliges Endmesser an der Preßschnecke zur Texturoptimierung des Stranges bei (s. Abschnitt 4.2.1.1.).

Zur Absicherung eines hohen Evakuierungseffektes sind die entscheidenden Bauteile durch Rundgummi abgedichtet. Die Vakuumkammer







◀ Bild 4.20. Schema der Vakuumstrangpresse PVP 75 [222] ▶

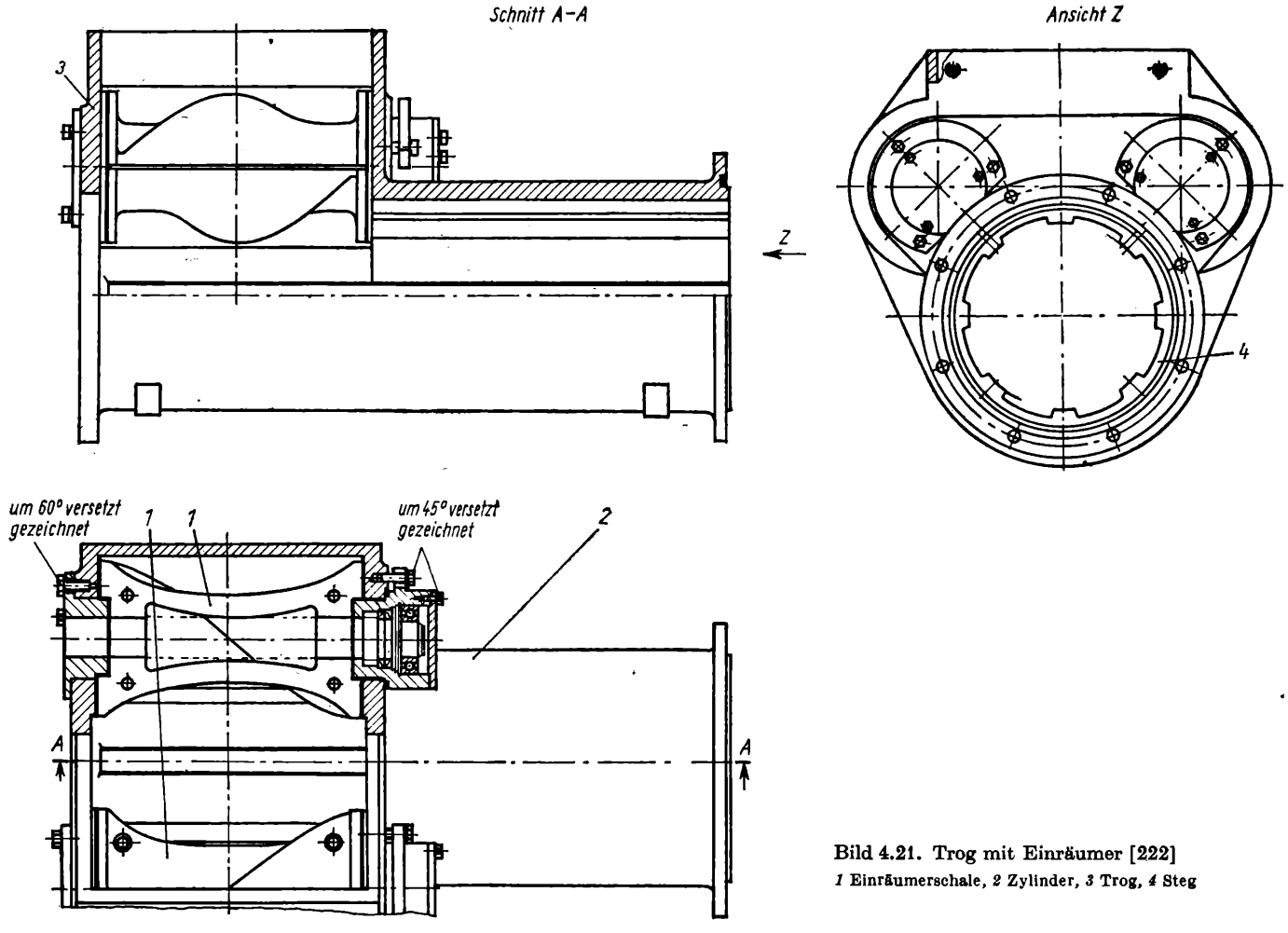


Bild 4.21. Trog mit Einräumer [222]
1 Einräumerschale, *2* Zylinder, *3* Trog, *4* Steg

wird bei allen Pressentypen generell rostfrei ausgeführt. Zur Erzeugung einer möglichst großen entlüftbaren Masseoberfläche können neben den bekannten Siebplatten auch Stabplatten, die eine stufenlos regelbare Einstellung des freien Massedurchtritts ermöglichen, eingesetzt werden.

Das Vakuum im Bereich von 8 bis 3 kPa wird bei den Pressen PVP 50 und PVP 75 durch Hubkolben-Naßluftpumpen [231] erzeugt. Die doppeltwirkenden Hubkolbenpumpen mit druckseitiger Ventil- und saugseitiger Kolbenschlitzsteuerung zeichnen sich durch große Zuverlässigkeit aus. Der erreichbare Enddruck ist von der Temperatur des eingespritzten Kühlwassers abhängig. Durch den Einsatz eines Umlaufgefäßes werden bis zu 80 % des Betriebswassers im Kreislauf gefördert. Mit einer Antriebsleistung von 10 kW erreicht die an der PVP 75 eingesetzte Pumpe vom Typ A VNL 1.4 bei 1,013 bar eine Saugleistung von 250 $m^3 h^{-1}$. Dadurch wird in Verbindung mit der großen freien Oberfläche der Masse in der Vakuumkammer eine sichere Entlüftung der Masse erreicht.

Zur Weiterverarbeitung des kontinuierlich aus dem Mundstück der Presse austretenden Massestranges verfügen die Pressen vom Typ PVP 50 und PVP 75 über eine Schneideinrichtung SE 50/75 und einen Kipptisch KT 50/75. Beide Nachfolgeeinrichtungen sind höhenverstellbar und für den jeweils größten Hubeldurchmesser ausgelegt. Der Kipptisch ermöglicht ein Wegkippen des geschnittenen Hubels auf bereitstehende Paletten oder andere Transporthilfsmittel wahlweise nach beiden Seiten.

4.2.1.3. Automatische Fertigungslinie für keramische Strangpreßerzeugnisse der Elektrokeramikindustrie, Typ AFA

Die Fertigungslinie Typ AFA des VEB Kema Görlitz, Betrieb des Kombinates Thuringia Sonneberg, dient der Herstellung von Hohl-, Profil- und Vollsträngen vor allem für oxidkeramische Materialien [230, 232]. Die wesentlichen Vorteile der Anlage bestehen in einem hohen Automatisierungsgrad und in der Möglichkeit, die Ziehfeuchte gegenüber herkömmlichen Strangpreßaggregaten zu reduzieren. Durch die geringere Ziehfeuchte werden die Handhabbarkeit des Stranges und die Trocknungsbedingungen verbessert. In Tabelle 4.7 sind die minimalen Ziehfeuchten für verschiedene Versätze angegeben.

Tabelle 4.7. Ziehfeuchte verschiedener Strangziehmassen zur Verarbeitung auf der Fertigungslinie AFA [232]

Versatz	Art der Plastifizierung	Ziehfeuchte in %
30 % Tonerde 50 % plastische Bestandteile 20 % Feldspat	Wasser	17
60 % Schmelzmagnesit 40 % plastische Bestandteile	Wasser	12
50 % Speckstein/ Talkum 30 % Schrühscherben 20 % plastische Bestandteile	Wasser	17
weichmagnetische Ferrite Manifer 340, 350, 360	organisch	12

Die Hauptgruppen der Anlage (Bild 4.22) sind

- der Schnellmischer (*3*),
- der Speicher (*4*),
- die Vakuumpresse PVP S10 (*5*),
- die Trennautomatik *AT*,
- die Belegungsautomatik *AB*,
- die Palettentransporteinrichtung (*19*) und
- der Trockner (*20*).

Im Mischer (*3*) wird das keramische Pulver bzw. Granulat mit Wasser oder organischen Plastifikatoren (*2*) nach wählbaren Programmen diskontinuierlich homogenisiert. Die je Mischung eingegebene Materialmenge kann je nach Bedarf zwischen 10 bis 50 kg variiert werden.

Aus dem Mischer (*3*) gelangt das zu verarbeitende Material in den Speicher (*4*), der der kontinuierlichen, regelbaren Beschickung der Zuführschnecke der Vakuumpresse PVP S10 dient. Zur Unterstützung des Masseeinzuges ist die Zu-

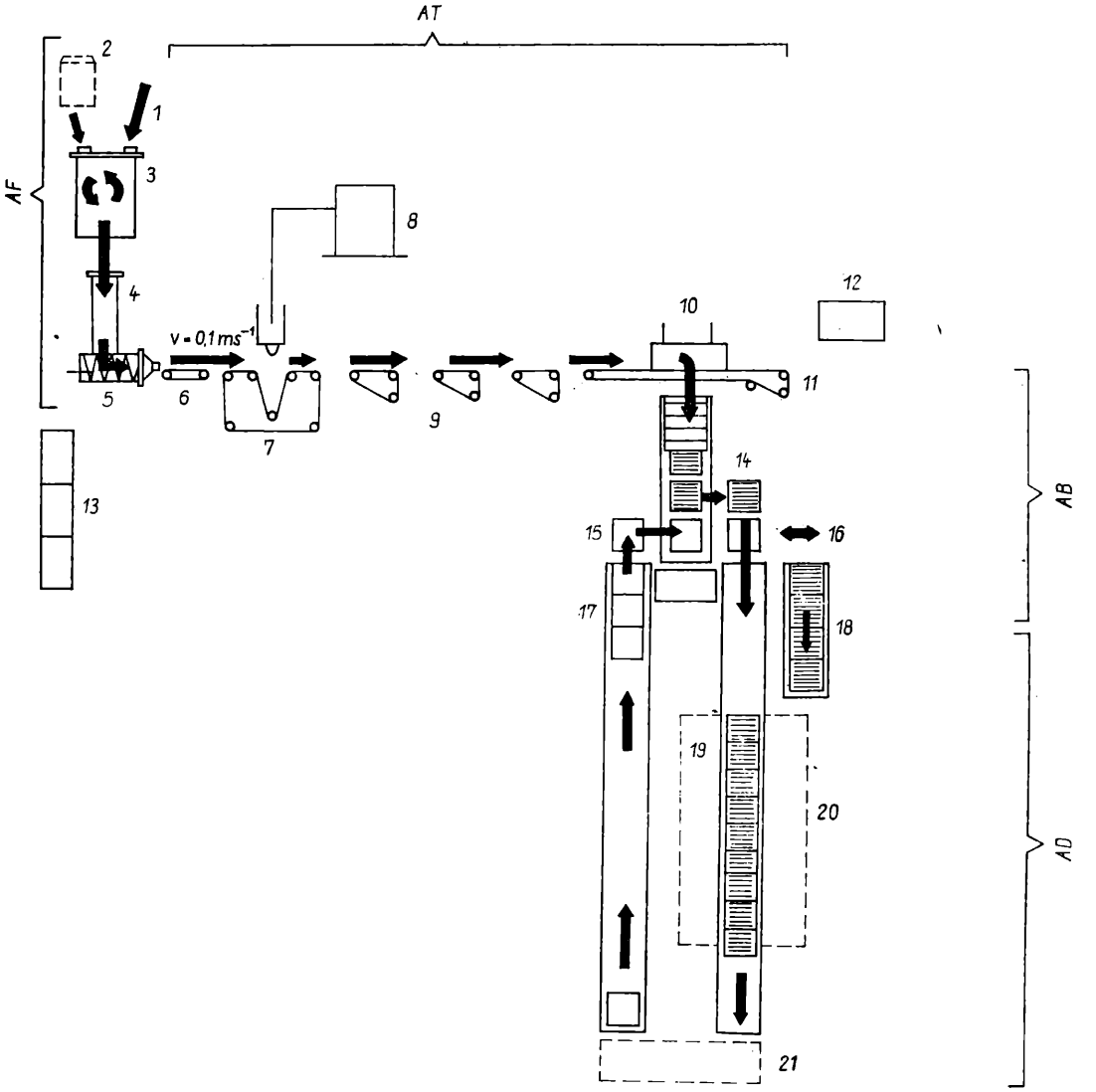


Bild 4.22. Übersicht über die automatische Fertigungslinie AFA für elektrokeramische Strangpreßerzeugnisse [222]

AF Aufbereitung und Formgebung
1 Rohstoffaufgabe, *2* Plastifikatoraufgabe, *3* Schnellmischer, *4* Speicher, *5* Vakuumstrangpresse PVP S 10
AT Trennautomatik
6 Transport- und Meßeinrichtung, *7* Strangabschneider, *8* Druckerzeuger, *9* Ausgleichsband, *10* Queraufgeber, *11* Übergabestation, *12* Bedienpult, *13* elektrische Steuerung
AB Belegungsautomatik
14 Belegungsautomat (je Palette 20 Stäbe), *15* Palettenstapelgerät (für 14 leere Paletten), *16* Palettenstapelgerät (für 14 volle Paletten), *17* Stapelzuführer, *18* Stapelabführer (mit Reservebahn)
AD Durchlaufförderer
19 Durchlaufförderer, *20* Trockner, *21* Einrichtung zum automatischen Entstapeln

führschnecke mit einer Speisewalze ausgerüstet. Die stark dimensionierten Antriebe der Presse PVP S10 (*5*) gestatten es, steifplastische Massen zu verarbeiten. Bei einer max. Preßkraft von 400 kN können Durchsätze bis zu 300 kg h^{-1} erreicht werden.

Für die unterschiedlichen Preßmassen und Durchsatzmengen stehen verschiedene Schnekken und Zylindereinsätze zur Verfügung. Austauschbare Preßköpfe, Mundstücke und Kernhalter ermöglichen die Fertigung von Strängen im Durchmesserbereich von 5 bis 18 mm. Alle mit der Masse in Berührung kommenden Bauteile sind rostfrei ausgeführt.

Die im rechten Winkel zur Zuführschnecke angeordnete Preßschnecke kann um deren Achse geschwenkt werden, so daß die Strangaustrittsrichtung den Erfordernissen im Einsatz anpaßbar ist. Die Entlüftung der Masse erfolgt zwischen Zuführ- und Preßschnecke. Zur Erhöhung der entlüftbaren Masseoberfläche wird eine Siebplatte eingesetzt. Um die Siebplatte auszutauschen, kann der Preßzylinder um 90° abgeschwenkt werden. Für bestimmte Anwendungsfälle ist es möglich, zur Abführung der Reibungswärme den Preßzylinder und den Preßkopf zu kühlen.

Der aus dem Mundstück der Presse austretende Strang gelangt über eine Meßeinrichtung (*6*) zur Trennautomatik *AT*. Zwecks Sicherung einer einwandfreien Meßwerteingabe in die numerische Steuerung (*13*) ist zur Kompensation der Reibwiderstände ein *Ferraris*-Motor angebracht. Die vom inkrementalen rotatorischen Geber entsprechend dem Strangvorschub abgegebenen Impulse werden gespeichert. Die numerische Steuerung verarbeitet die gespeicherten digitalen Werte zur Steuerung des Synchronlaufes zwischen Strang und Transportbändern einerseits sowie Strang und Schneidschlitten während des Trennvorganges andererseits. Eine weitere Verarbeitung der gespeicherten Impulse sichert eine exakte voreinstellbare Schnittlänge. Das Schneiden erfolgt durch einen 0,2-mm-Hochdruckflüssigkeitsstrahl in Stücken von 150 bis 300 mm [233]. Durch diese Trenntechnologie werden Schnittflächen von hoher Qualität erzielt, so daß für viele Anwendungsfälle eine Nachbearbeitung, z. B. durch Schleifen, entfällt. Im Bedarfsfall (Pelletherstellung) können die Stranglängen durch eine Zusatzeinrichtung im Längenbereich von 25 bis 150 mm noch weiter unterteilt werden.

Die Vereinzelung des getrennten Stranges erfolgt durch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit laufende Transportbänder..

Mit Hilfe der Übergabeeinrichtung (*11*) und der Belegungsautomatik (*14*) werden die vereinzelten Stränge auf speziell entwickelte, trocknungstechnisch optimierte Paletten abgelegt. Die Paletten werden im Stapel (*16*) durch einen Trockner (*20*) geschickt und gelangen nach der Entleerung zur Belegungsautomatik zurück.

Die elektrische Steuerung ist so ausgelegt, daß umfangreiche Stellmöglichkeiten sowohl für die einzelnen Teilkomplexe als auch für die Gesamtanlage vorhanden sind. Durch den Einsatz von Stellgetriebe- und thyristorgeregelten Motoren besteht die Möglichkeit, die Drehzahlen für die Antriebe der Aufbereitung und Formgebung kontinuierlich und abhängig voneinander zu regeln. Die Steuerung der Trenn- und

Tabelle 4.8. Technische Daten der Gesamtanlage AFA [233]

Chargengröße Mischer	50 kg
Mischflügeldrehzahl	0...700 min^{-1}
Speichervolumen	60 kg
Vakuum	6...10 kPa
zulässige Stranggeschwindigkeit	10 m min^{-1}
Nennstranggeschwindigkeit bei einem Durchmesser von ≈ 10 mm	6 m min^{-1}
Strangdurchmesser	5...18 mm
Schnittlängen der Strangstücke	150...300 mm
Schnittlängen der Pellets	25...150 mm
Durchsatzleistung bei 10 mm Strangdurchmesser	120 kg h^{-1}
Schneidwasserdruck	60 MPa
Schneidwasserbedarf für 1 Düse	0,5 l min^{-1}
Schneidwasserbedarf für 14 Düsen	7 l min^{-1}
elektrische Einspeisung	400 A, 3 N, 50 Hz, 380/220 V
Anschlußleistung	55 kW
Anschlußwert Druckluft	0,6 MPa
Arbeitsdruck Druckluft	0,4 MPa
Luftbedarf	5 m^3 h^{-1}
Kühlwasserbedarf für Preßzylinder und Vakuumpumpe	0,6 m^3 h^{-1}
Abmessungen: Länge, Breite, Höhe	12 m × 10 m × 5 m
Gesamtmasse	10 t

Belegungsautomatik übernehmen sequentielle und kombinatorische Schaltungen auf der Grundlage von NC-Steuerungen und elektronischen Baugruppensystemen.
Die technischen Daten der Gesamtanlage sind in Tabelle 4.8, die der Vakuumstrangpresse PVP S10 in Tabelle 4.9 angegeben.

Tabelle 4.9. Technische Daten der Vakuumschneckenpresse PVP S 10 [222]

Durchsatzleistung (bei 9 bis 11 mm Strangdurchmesser)	etwa 120 kg h^{-1}
Preßschneckennenndurchmesser	100 mm
Strangdurchmesser, max.	50 mm
Schneckendrehzahl (regelbar über Fernsteuerung)	
Zuführschnecke	8...32 min^{-1}
Preßschnecke	7...28 min^{-1}
Axialkraft (Preßschnecke), max.	etwa 400 kN
Strangfeuchte (je nach Einsatzgebiet, Rohstoff u. Plastifikator)	etwa 12...20 %
installierte Leistung	9,2 kW
Abmessungen (bei horizontalem Strangaustritt)	
Länge	3300 mm
Breite	1300 mm
Höhe	1500 mm
Masse	etwa 1900 kg

4.2.1.4. Vakuum-Aggregat »COMPACTA«, Typ PZVA 60a/56

Das Vakuumaggregat vom Typ PZVA 60a/56 ist eine Formgebungsmaschine für die Grobkeramik aus der Baureihe »COMPACTA« der Firma Karl Händle & Söhne GmbH & Co. KG, Mühlacker [221, 234, 235]. Die Maschine gestattet eine Durchsatzleistung bis 32 $m^3 h^{-1}$ bzw. 12800 NF h^{-1}. Bei einem max. Preßdruck von 2,4 MPa ist das Vakuumaggregat für die Weich- und Halbsteifverpressung einsetzbar. Mit dem Preßzylinder von 560 mm Durchmesser können z. B. Großblock- bzw. Leichtziegel bis 15 NF gefertigt werden. Die erforderliche elektrische Antriebsleistung beträgt je nach Durchsatzleistung, Strangquerschnitt und zu verarbeitender Masse bis 250 kW.

Das Vakuumaggregat besteht aus den drei Hauptgruppen (Bild 4.23)

- Getriebe,
- Doppelwellenmischer mit Vakuumkammer,
- Presse

und steht auf einem Grundrahmen, der integrierender Bestandteil der Maschine ist. Am Rahmen ist eine hydraulische Hub- und Senkvorrichtung angebracht. Mit dieser Vorrichtung kann bei unterschiedlichen Formaten die Austrittshöhe des Mundstückes an die Höhe des Zuführbandes des Abschneiders angepaßt werden, so daß der oder die Stränge stets horizontal weiterbewegt und somit Spannungen vermieden werden.
Die gedrungene und kompakte Bauweise der Baureihe »COMPACTA« mit einer Bauhöhe von z. B. etwa 2200 mm beim Typ PZVA 60a/56 wird u. a. durch das gemeinsame Getriebe für den Mischer und die Presse erreicht. In die Antriebsriemenscheibe des Getriebes ist eine einstellbare Druckluftkupplung integriert, durch die ein sanftes Einschalten gewährleistet wird. Das Getriebe besitzt eine ölhydraulisch geschaltete Lamellenkupplung zum separaten Auskuppeln des Mischers. Für das Getriebe werden einsatzgehärtete und geschliffene Zahnräder verwendet, die in Verbindung mit einer automatischen Ölumlaufschmierung eine weitgehende Verschleißminimierung garantieren. Der Öldruck und die Öltemperatur der Schmierung sind kontrollierbar. Für Sonderfälle kann eine Ölkühleinrichtung mit Thermostat eingesetzt werden.
Die Getriebewellen, die dem Antrieb der beiden gegenläufigen Mischerwellen s. Bild 4.24, dienen, sind als Hohlwellen ausgebildet, so daß die Montage der Mischerwellen ohne Öffnung des Getriebes erfolgen kann. Der Doppelwellenmischer hat eine Trogbreite von 900 mm, eine Mischtroglänge von 2000 mm und eine nachfolgende Druckzone von 550 mm. Die ineinandergreifenden Mischmesser sind verstellbar ausgebildet, wodurch die Durchsatzleistung des Mischers und die Intensität der im Mischtrog stattfindenden Quermischung variiert werden können. Der Doppelzylinder der Druckzone, der für die Homogenisierung ausschlaggebend ist, kann durch Einschub weiterer Zylinderteile nachträglich verlängert werden, so daß es auch in diesem Bereich möglich ist, sich an die jeweilige zu verar-

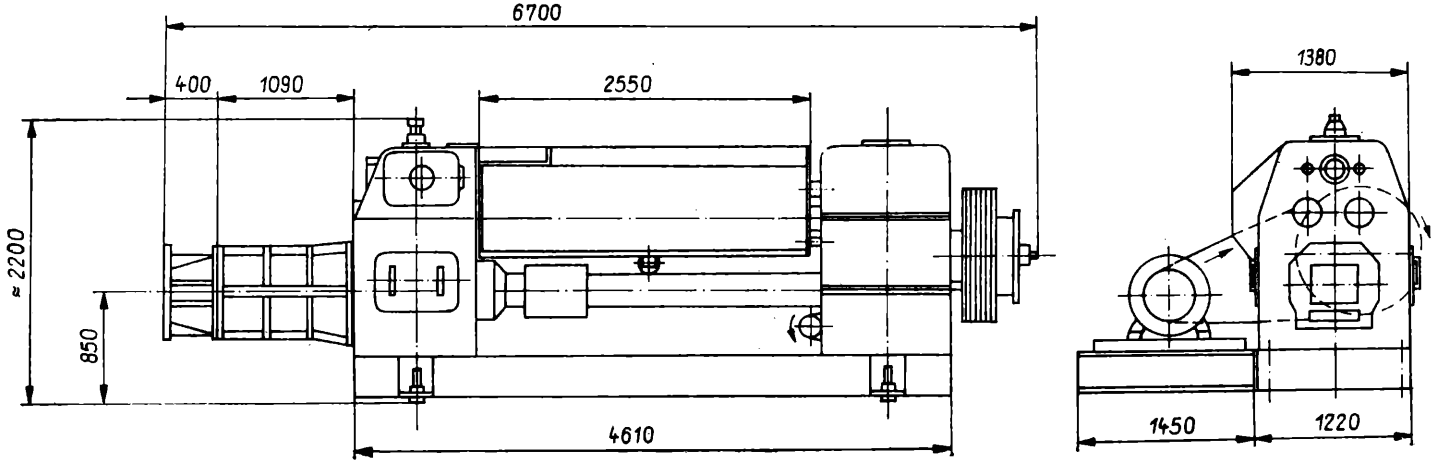


Bild 4.23. Vakuumaggregat »COMPACTA«, Typ PZVA 60a/56 [234]

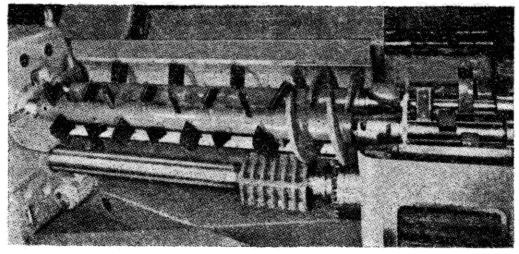


Bild 4.24. Geöffneter, zweigeteilter Mischtrog der PZVA 60a/56 [234]

beitende Masse anzupassen. Außerdem ist es dadurch möglich, die Plastizität der Masse bereits im Doppelzylinder und nicht erst im Preßkopf durch entsprechende Druckmeßeinrichtungen zu bestimmen, so daß die Werte vor der Formgebung vorliegen. Der Trog des Mischers ist, s. Bild 4.24, zweiteilig ausgeführt. Durch die Demontage jeweils einer Troghälfte können die Verschleißteile des Mischers, z. B. die Schnekkenbeläge der Doppelschnecke im Bereich der Druckzone, leicht ausgewechselt werden.

Die Doppelschnecke preßt die Masse durch zwei dünne Ringspalte, die aus sich konisch verengenden Mundstücken mit gezackter Oberfläche und aus auf den Wellen sitzenden sich erweiternden Konussen bestehen. Durch Einsätze von unterschiedlicher Konizität wird der Austrittsquerschnitt des Doppelzylinders variiert. Dadurch kann der Druckaufbau im Doppelzylinder und damit auch die Homogenisierungsintensität auf die jeweiligen Bedingungen abgestimmt werden.

Die in die Vakuumkammer eintretenden Massestränge werden von mehrschneidigen auf den Mischerwellen befestigten und mit diesen umlaufenden Schnitzelmessern in etwa 6 mm starke Massestücke zerteilt. Durch Haspeln, die ebenfalls auf den beiden Mischerwellen befestigt sind, werden die Massestücke in die Preßschnecke bewegt. Oberhalb der Haspeln besitzt die Vakuumkammer einen Rückstauwächter, der im Falle eines Massestaus das automatische Auskuppeln des Mischers steuert, so daß sich die Presse wieder freiarbeiten kann.

Die eigentliche Presse des Vakuumaggregates besteht aus den Hauptelementen

- Gehäuse mit Speisezone,
- Drucklager,
- Schneckenwelle mit aufgeschobenen Schnekkensegmenten,
- Zylinder mit Zylinderauskleidung,
- Preßkopf und Mundstück.

Der Schneckendurchmesser (s. Bild 4.25) der »COMPACTA« PZVA 60a/56 beträgt in der Speisezone 600 mm und verjüngt sich dann im Zylinderteil auf 560 mm. Diese Maßnahme bewirkt eine gute Speisung der Schnecke, was sich besonders positiv auf den Durchsatz der Maschine auswirkt. Zur Steigerung des Durchsatzes trägt auch der Einsatz von zur Steigung der

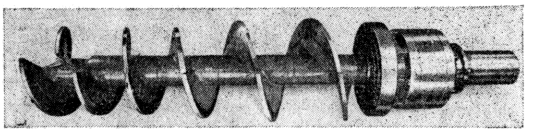


Bild 4.25. Schnecke des Vakuumaggregates PZVA 60a/56 [234]

Schnecke gegenläufigen Spiralleisten der Zylinderauskleidung bei (s. Bild IV, Kunstdruckteil).

Die Schnecke wird je nach Einsatzgebiet der Presse (Weich-, Halbsteifverpressung usw.) mit unterschiedlicher Geometrie und Ausführung, z. B. Schnecke mit oder ohne Verschleißbeläge, hergestellt. Die Schnecke weist in Förderrichtung sich verengende Schneckengänge auf und endet in einer Spitzkopfschnecke mit zwei symmetrischen Flügeln.

Die Schnecke wird in einem starkdimensionierten Drucklager gelagert. Eine Schalenkupplung ist mit dem Getriebe verbunden. Nach Lösen der Kupplung kann man die Schnecke komplett mit dem Lager nach vorn ausbauen. Dazu wird der Preßkopf demontiert und der zweiteilige Zylinder von der Schnecke weggeschwenkt. Zum Schnellwechsel von Preßkopf mitsamt Mundstück kann eine Zwischenplatte mit Scharnieren für zwei seitlich wegklappbare Preßköpfe, die am Zylinder verschraubt wird, eingesetzt werden.

In Tabelle 4.10 sind der elektrische Leistungsbedarf und der Volumendurchsatz der PZVA 60a/56 in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl dargestellt. Weitere technische Daten enthält Tabelle 4.11.

Tabelle 4.10. Elektrischer Leistungsbedarf und Durchsätze in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl [234]

Leistungsbedarf, max. in kW	Volumendurchsatz in $m^3\ h^{-1}$	Drehzahl Schneckenwelle in min^{-1}
125	16,00	14,2
139	17,75	15,8
155	20,00	17,7
175	22,50	19,9
197	25,25	22,5
222	28,50	25,3
250	32,00	28,5

Tabelle 4.11. Technische Daten des Vakuumaggregats PZVA 60a/56 [234]

Durchsatz je nach Preßmasse, Drehzahl der Schneckenwelle und dem Strangquerschnitt, max.	etwa 32 $m^3 h^{-1}$
entsprechend	12800 $NF_{vol} h^{-1}$
erforderlicher Leistungsbedarf, max.	250 kW
Preßzylinderdurchmesser	560 mm
Preßzylinderlänge	1090 mm
Preßkopflänge	400 mm
Preßdruck, max.	2,4 MPa
Mischtroglänge	2000 mm
Mischtrogbreite (innen)	900 mm
Länge des Doppelzylinders	550 mm
Gesamtlänge	6700 mm
Breite mit Motor	etwa 2700 mm
Höhe	etwa 2200 mm
Nettomasse	17500 kg

4.2.2. Rolleranlagen

4.2.2.1. Vorbemerkungen

Das Drehen von rotationssymmetrischem Hohl- und Flachgeschirr mit der Schablone war bis zur Einführung der Rollermaschinen die übliche Formgebungsmethode. Aufgrund ihrer höheren Produktivität hat heute die Rollerformgebung die Schablonenformung fast völlig aus den Geschirrkeramikwerken verdrängt.

Wie bei den anderen Formgebungstechnologien in der Keramik, hat sich die Entwicklung bei der Rollerformgebung von der Einzelmaschine zur mechanisierten bzw. automatisierten Fertigungslinie vollzogen. Für die Fertigungslinien wurden erzeugnisspezifische Ausformaggregate entwickelt. Mit diesen Rollermaschinen werden z. T. mehrere Artikel gleichzeitig ausgeformt. Daneben haben die herkömmlichen Rollermaschinen in vielen Keramikbetrieben für Qualitätsgeschirr, kleine Serien und Sonderartikel ihre Bedeutung behalten.

Es sind Maschinen mit mechanischer, hydraulischer oder pneumatischer Steuerung der Bewegungsabläufe bekannt geworden. In bezug auf die Bewegungen von Rollerwerkzeug und Ausformspindel unterscheidet man die in Abschnitt 3.2.4.1. genannten Varianten.

Außerdem kann man beim Überformen, s. Abschnitt 3.2.4.2., zwischen Rollerwerkzeugen mit einem fest eingestellten Neigungswinkel zur Spindelachse und solchen, bei denen sich während des Ausformens der Neigungswinkel im Bereich von 0 bis 15° ändert (Schwenkroller), unterscheiden.

Das eigentliche Formgebungswerkzeug, der *Rollerkopf*, wird in den Geschirrkeramikbetrieben entsprechend dem gewünschten Scherbenprofil selbst gefertigt. Dabei wird im allgemeinen nach folgenden Teilschritten verfahren:

- *Anfertigen eines Gipsformenhalbschnittes*
  Die Mittellinie wird markiert und die Form neben der Linie aufgeschnitten. Es schließt sich das Nachschleifen bis auf Strichmitte an (s. Bild 4.26).

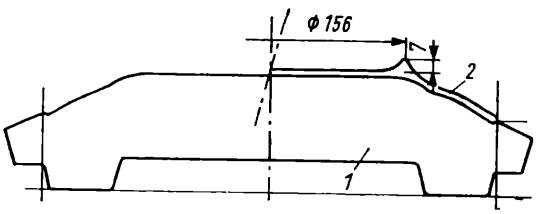


Bild 4.26. Gipsformenhalbschnitt mit Scherbenprofil
1 Gipsform, *2* Scherbenprofil

- *Anfertigen der Aufrißzeichnung*
  Nach der Konstruktion des Scherbenprofils wird die Aufrißzeichnung des Rollerkopfes (s. Bild 4.27), einschließlich Angabe der Fußhöhe, des Fußdurchmessers und Einstellwinkels, erstellt.
- *Herstellung der Stahlschablone und der Gegenschablone*
  Die Schablone wird nach der Aufrißzeichnung aus etwa 2 mm dickem Stahlblech gefertigt. Sie entspricht der Kontur der Tellerunterseite. An die Stahlschablone wird aus PVC mit einer Schichtdicke von etwa 1,5 bis 2 mm die Gegenschablone angegossen. Die Gegenschablone dient zur Kontrolle des fertiggedrehten Rollerkopfes.
- *Vordrehen des Stahlrohlings*
  Der Rohling wird aus etwa 50 mm dickem Rundstahl (z. B. St42, St60) mit entsprechen-

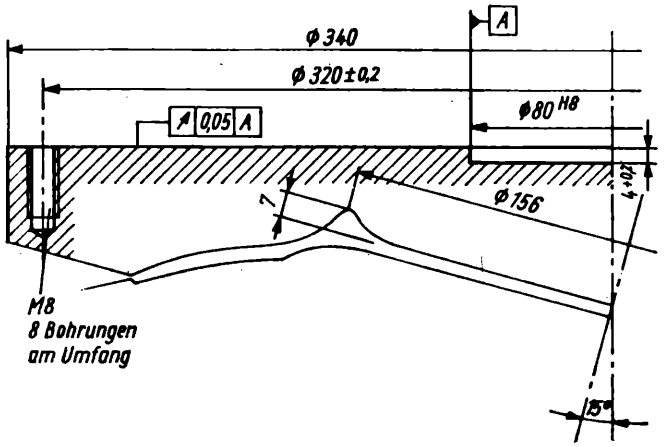


Bild 4.27. Rollerkopf mit Scherbenprofil [91]

dem Durchmesser vorgedreht und der Aufnahmezapfen ausgedreht. Das Einbringen der Aufnahmebohrungen (s. Bild 4.27) erfolgt mittels Bohrschablone.

- *Einspannen der Stahlschablone*
  Sie wird in die Kopiervorrichtung einer Drehmaschine unter Beachtung des Neigungswinkels (15°) eingespannt.
- *Kontrolle und Abnahme des polierten Rollerkopfes*
  Dies erfolgt mittels (PVC-)Gegenschablone.
- *Kennzeichnung des Rollerkopfes*
  Dazu sind Typ, Zeichnungsnummer und Datum anzugeben.

Für bauchige, hinterdrehte Einformartikel, s. Abschnitt 3.2.4.3., werden Rollermaschinen mit einem sogenannten Rückzug eingesetzt. Durch diese Vorrichtung werden das Rollerwerkzeug oder die Ausformspindel mit der Form horizontal verschoben. Bei der Verwendung von einteiligen Arbeitsformen können die Artikel jedoch nur so weit hinterdreht ausgeführt werden, wie die Schwindung eine Entnahme des Artikels aus der Form gestattet.

Rollermaschinen und Fertigungslinien für größere Teller sind im allgemeinen mit einer *Blattquetscheinrichtung* zur Erhöhung der Erzeugnisqualität ausgerüstet. Durch die Zuordnung von Vakuumdosierpressen oder Blattdosieranlagen, die die Masseblätter aus vorgezogenen Hubeln herstellen, zu den Formgebungsmaschinen wurde die Mehrmaschinenbedienung bzw. die Erhöhung der Maschinenleistung möglich. Bild 4.28 zeigt den schematischen Aufbau des Formgebungsbereiches einer Tellerproduktionsanlage für Flachgeschirr bis 26 cm Durchmesser mit einer Leistung von 1200 Stück/h.

Die Einteilung der Rollermaschinen und Fertigungslinien legt die auf ihnen gefertigten Artikel zugrunde. Man unterscheidet Maschinen und Anlagen für

- Becher,
- Schalen und Teller bis 19 cm Durchmesser,
- Teller von 19 bis 26 cm Durchmesser und
- Großgeschirr.

Analog dieser Einteilung erfolgt die maschinentechnische Auslegung der Antriebe, der Hubbewegungen und der Rollerkopfheizungen. Bei allen Anlagen wird während des Ausformvorganges die Arbeitsform durch Vakuum in der Spindelaufnahme gehalten.

Bild 4.29 zeigt ein Beispiel für eine kurvengesteuerte Rollermaschine mit sechsteiligem Drehtisch für die Arbeitsformen, der durch einen Maltesertrieb schrittweise bewegt und durch eine mechanische Kurve gehoben und abgesenkt wird. Durch den koordinierten Bewegungsablauf des Tisches werden die Formen, die sich in Formenaufnahmen befinden, taktweise zu der ortsfesten Ausformspindel abgesenkt. Die Bewegungen des Rollerkopfes und das Vakuumventil sind ebenfalls durch Kurven gesteuert.

Bild 4.30 enthält Ausführungsarten von Kurvengetrieben, die im Keramikmaschinenbau vielfach Anwendung finden. Bei Kurvengetrieben für die Ausformspindel bzw. den Rollerkopf,

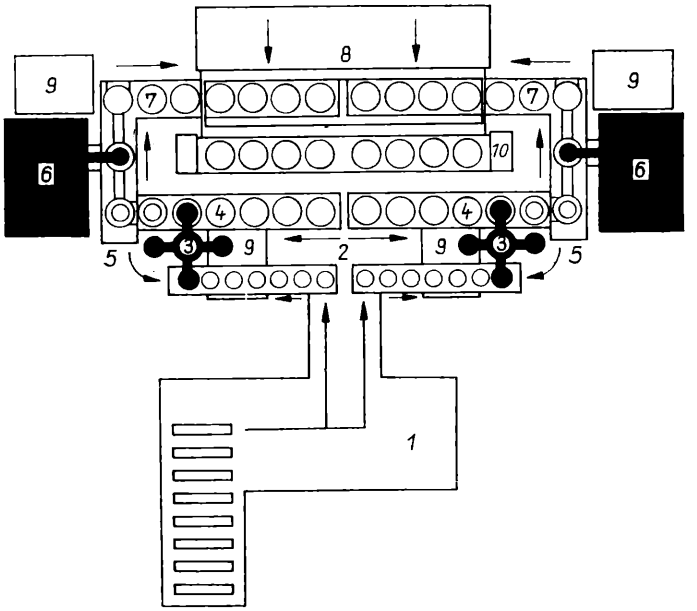


Bild 4.28. Schematischer Aufbau des Formgebungsbereiches einer Tellerproduktionsanlage für Flachgeschirr bis 26 cm Durchmesser der Netzsch Maschinenfabrik, Selb [211]

1 Dosierpresse mit automatischem Abscheider, *2* Massezuteilbänder, *3* Blattquetschvorrichtung mit pneumatischer Übergabe, *4* Formentransportband, *5* Formenumsetzvorrichtung, *6* Tellerrollermaschine, *7* Formentransportband, *8* Formenschubvorrichtung, *9* Massekästen, *10* Lederhart-Schaukeltrockner

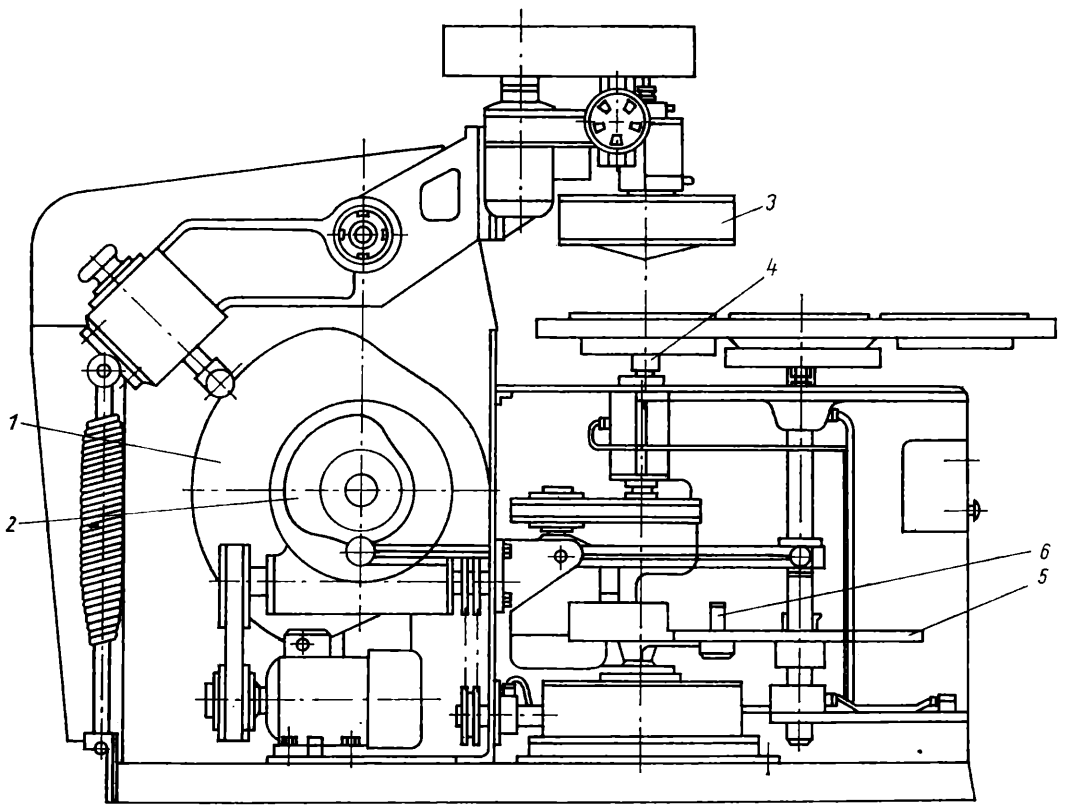


Bild 4.29. Rollermaschine [215]

1 Ausformkurve, *2* Kurve für den Tischhub, *3* Rollerkopf, *4* Spindel, *5* Malteserkreuz, *6* Treiberbolzen

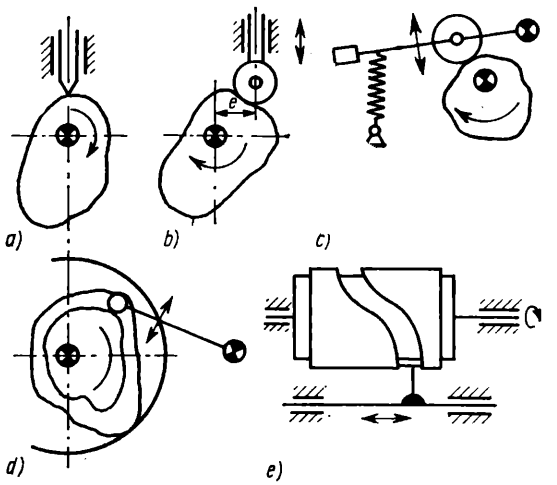


Bild 4.30. Ausführungsarten von Kurvengetrieben

a) mit zentrisch gerade geführtem Stößel

b) mit exzentrisch gerade geführter Rolle

c) Kraftschluß durch Feder und Massenträgheit (Bei $m(a + g) > F$ erfolgt kein Zwangslauf.)
m Masse, F Federkraft, a durch die Kurve bewirkte Beschleunigung, g Erdbeschleunigung

d) Nutkurve mit einfacher Rolle (beim Wechsel der Rolle von der äußeren Bahn auf die innere plötzlicher Drehrichtungswechsel der Rolle)

e) Zylinderkurvengetriebe (Topfkurve)

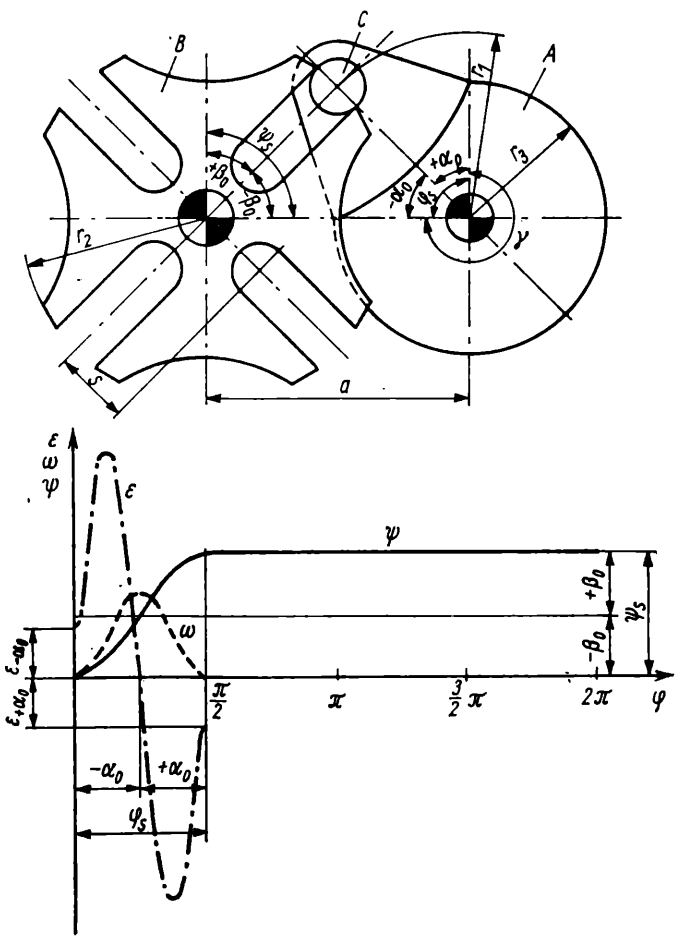


Bild 4.31. Konstruktiver Aufbau und Bewegungsablauf eines Malteserkreuz-Getriebes

A Treiber, B Kreuz, C Treiberrolle
a Achsabstand, α_0 Winkel für Beschleunigung am Treiber, β_0 Winkel für Beschleunigung am Kreuz, φ_s Winkel für Schaltperiode am Treiber, ψ_s Winkel für Schaltperiode am Kreuz, γ Winkel für Sperrsegment, s innere Begrenzung des Schlitzes, r_1 Radius des Treibers, r_2 Radius des Kreuzes, r_3 Radius des Sperrsegmentes, ω_0 Winkelgeschwindigkeit am Treiber, ω Winkelgeschwindigkeit am Kreuz, ε Winkelbeschleunigung am Kreuz

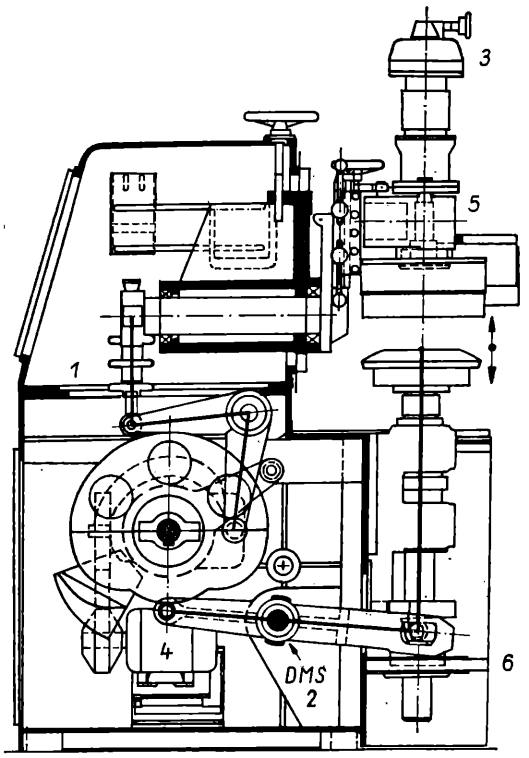


Bild 4.32. Netzsch-Rollermaschine Fig. 517.03 mit eingebauten Sensoren für Bildsamkeitsmessungen unter Betriebsbedingungen [236]

1 Kraftmessung (DMS) für Rollerkippen, *2* Kraftmessung (DMS) für Spindelhub, *3* Antriebsleistung Rollermotor, *4* Antriebsleistung Spindelmotor, *5* Umdrehungsgeschwindigkeit des Rollerkopfes, *6* Umdrehungsgeschwindigkeit der Spindel

deren Bewegungsablauf für die Qualität der geformten Erzeugnisse große Bedeutung besitzt, ist es wichtig, daß die empirisch gefundene Kurvengeometrie stets eingehalten und bei auftretenden Verschleißerscheinungen die Kurve ausgetauscht wird.

Zur Realisierung von taktweisen Bewegungsabläufen wird das Malteserkreuz-Getriebe (Bild 4.31) eingesetzt. Bei diesem Schrittgetriebe ist die Bewegungszeit wesentlich kürzer als die Stillstandszeit, so daß im Stillstand genügend Zeit für notwendige andere Bewegungsabläufe an den Maschinen bzw. für die Trocknung unter Düsen (Trocknerantrieb) vorhanden ist.

Um technologische, artikelspezifische Drehzahlen und Bewegungen einstellen bzw. um die Leistungen der Maschinen und Anlagen variieren zu können, werden in vielen Fällen verstellbare Getriebemotoren eingesetzt. An der Rollermaschine (Bild 4.29) sind die Drehzahlen des Getriebes, der Ausformspindel und des Rollerkopfes über Spreizkeilriemen in bestimmten Bereichen stufenlos regelbar. Diese und andere Rollermaschinen stellen seit vielen Jahren den Stand der Technik dar.

Während im zurückliegenden Jahrzehnt vor allem an der Entwicklung der isostatischen Preßtechnik für Geschirr gearbeitet wurde, s. Abschnitte 3.3.5., 4.3.6.2. und 4.3.6.3., sind in den letzten Jahren auch wieder Arbeiten zur Verbesserung des Rollerverfahrens bekannt geworden, die sich in erster Linie mit den Problemen des Formenwerkstoffes und der Realisierung definierter, reproduzierbarer Ausformparameter beschäftigen. Bild 4.32 zeigt eine Rollermaschine mit Schwenkroller, die mit Sensoren für die Bildsamkeitsmessung (Kraftsensoren, s. Ab-

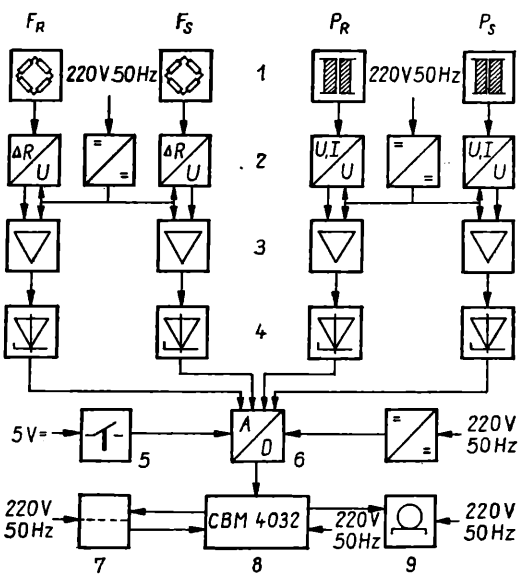


Bild 4.33. Blockschaltbild für eine Datenverarbeitungsanlage zur Untersuchung der Bildsamkeit bei Verformung unter Betriebsbedingungen in einer Rollermaschine (4 Kanäle) [236]

F_R und F_S Kraftmessung über DMS an elastischen Maschinenteilen

P_R und P_S Antriebsleistungen an zwei Motoren

1 Meßwertaufnehmer, *2* Meßwert- und Spannungswandler, *3* Meßverstärker, *4* Spannungsbegrenzer, *5* Startsignalgeber, *6* Analog/Digital-Wandler, *7* Diskettenspeicher, *8* Tischrechner CBM 4032, *9* Drucker

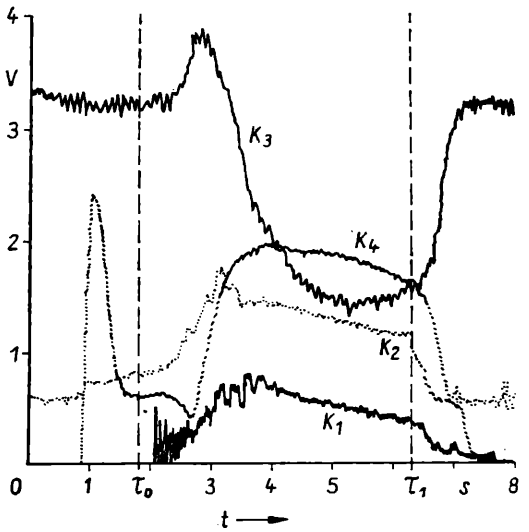


Bild 4.34. Zeitgleiche Darstellung der Ausgangsspannungen nach digitaler Speicherung beim Verarbeiten einer plastischen Masse auf einer Rollermaschine unter Betriebsbedingungen [236]

K_1 Rollerkippen (Kraftverlauf), K_2 Spindelheben (Kraftverlauf), K_3 Rollerantrieb (Leistungsverlauf), K_4 Spindelantrieb (Leistungsverlauf)

schnitt 2.5.3.) unter Betriebsbedingungen ausgerüstet ist. Bild 4.33 stellt das Blockschaltbild für die entsprechende Datenverarbeitungsanlage mit Meßwertaufnehmer, Wandler, Verstärker, Speicher, Rechner und Drucker dar. Als ein typisches Ergebnis gibt Bild 4.34 den zeitlichen Kraftverlauf für das Spindelheben und das Rollerkippen sowie den Leistungsverlauf von Roller- und Spindelantrieb unter Betriebsbedingungen wieder.

4.2.2.2. Becherfertigungslinie Be 2-L

Die Becherfertigungslinie Be 2-L des VEB Thuringia Sonneberg, Kombinat für Glas- und Keramikmaschinenbau, dient zum Herstellen von Bechern und Dosen mit einem max. Durchmesser von 120 mm und einer max. Höhe von 110 mm aus Porzellan, Steingut, Sintolan oder ähnlichen keramischen Massen. Die Leistung der Anlage beträgt je nach Form, Scherbendicke und Größe der Artikel sowie den Verarbeitungseigenschaften der zur Verwendung kommenden Masse 800 bis 1 200 Stück/h [215]. Für Hotelbecher beträgt die max. Durchsatzmenge 800 Stück/h bei einer Masse des frischgeformten Bechers von $\leqq$400 g.

Die Anfangsfeuchte der zur Verwendung kommenden Masse sollte in den Grenzen von 20 bis 21 % liegen.

Die Bewegungsabläufe der Becherfertigungsanlage (Bild 4.35) werden mechanisch, hydraulisch und pneumatisch gesteuert.

Die Massehubel mit einem Durchmesser bzw. einer Kantenlänge bis 150 mm werden auf das schräg angeordnete Pufferband der Vakuumpresse aufgelegt. Gesteuert über eine Fotozelle, fallen die Massehubel nacheinander in einen Einschubtrog. Vom Trog aus, der in einem Winkel von 90° zur Schneckenwelle angeordnet ist, werden die Hubel durch einen hydraulischen Vorschub in Richtung Schnecke bewegt und von dieser eingezogen.

Die Vakuumpresse ist eine Einschneckenpresse mit Vakuumkammer und Doppelpreßkopf (Bild 4.36). Der Mittenabstand der beiden Mundstücke entspricht der Teilung der horizontal umlaufenden Gliederkette des Lederharttrockners. Die beiden periodisch austretenden Massestränge werden mittels Fotozellen auf Länge dosiert und von der Hubeleinlegevorrichtung erfaßt. Nach dem Abschneiden mit einem Bügelabschneider (s. Bild 4.17) schwenkt die Einlegevorrichtung die Hubelstücken um 90° nach unten und setzt sie in die Arbeitsformen senkrecht ein.

Bild 4.37 zeigt die Ausformstation. Die Arbeitsformen aus Gips oder einem Kunststoff (s. Abschnitt 3.2.4.3.) werden durch die Transportkette des Lederharttrockners zu den beiden Ausformspindeln bewegt. Die Realisierung der Schrittbewegung der Kette erfolgt durch ein Malteserkreuz (s. Bild 4.31). Die Schrittlänge beträgt jeweils 400 mm bei einer Kettenteilung von 200 mm. Die Arbeitsformen werden durch die Ausformspindeln aus den Aufnahmen der Kette gehoben. Das Anheben und Senken der Ausformspindeln erfolgt durch eine mechanische Topfkurve (s. Bild 4.30 e). Befinden sich die Formen in ihrer oberen Stellung, werden über Elektromagnetkupplungen die Spindeln in Drehung versetzt. Die Drehzahl beträgt wahlweise 1 000 oder 1 200 min^{-1}.

Die Rollerköpfe werden hydraulisch um eine Achse in die Formen geschwenkt. Entsprechend der Steuerung kann die Schwenkbewegung in

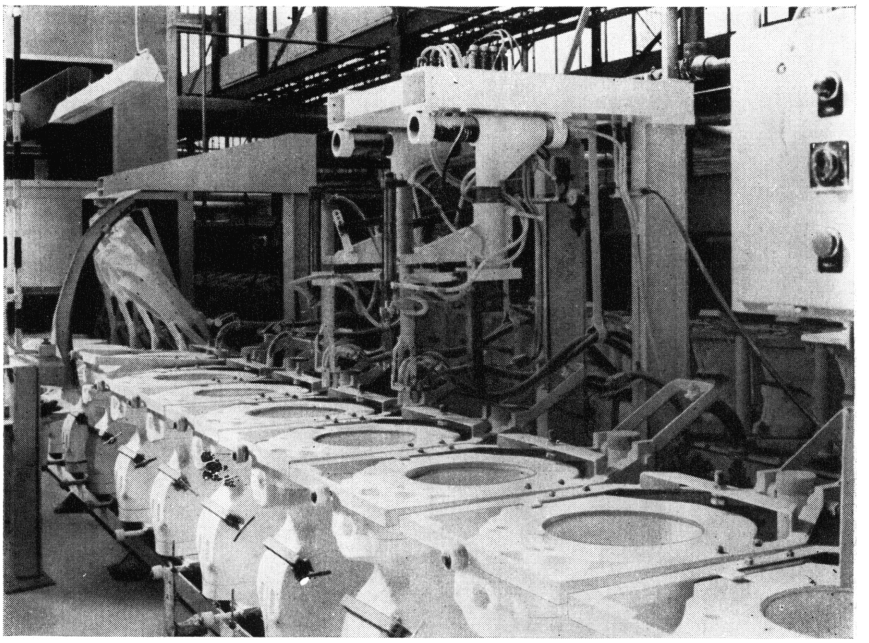


Bild I: Gießstation der automatischen Gießbandanlage für WC-Becken der Fa. Gebrüder Netzsch, Maschinenfabrik GmbH & Co., Selb

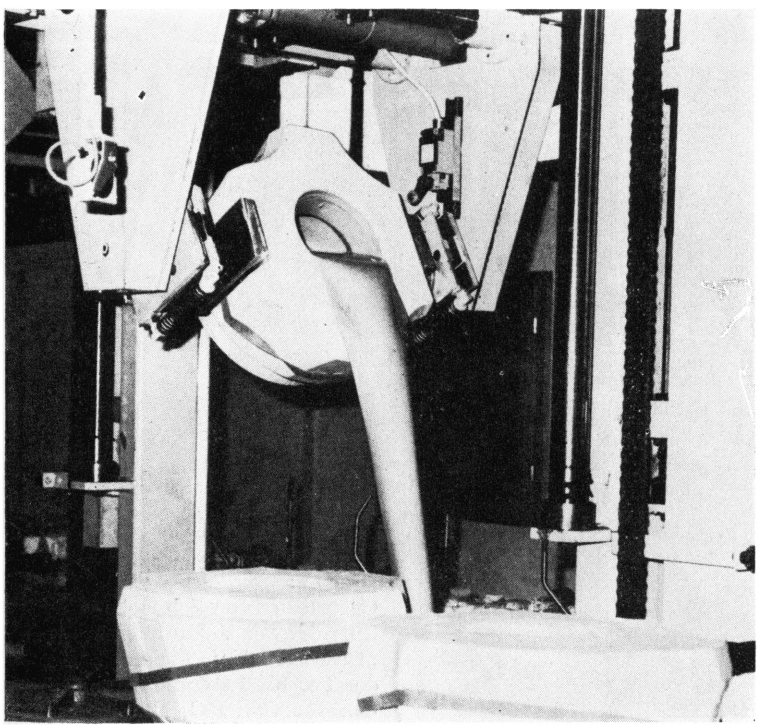


Bild II:
Ausgießstation der Gießlinie für Hohlware G 114 der Fa. Julius Lippert, Maschinen- und Stahlbau GmbH & Co., Pressath

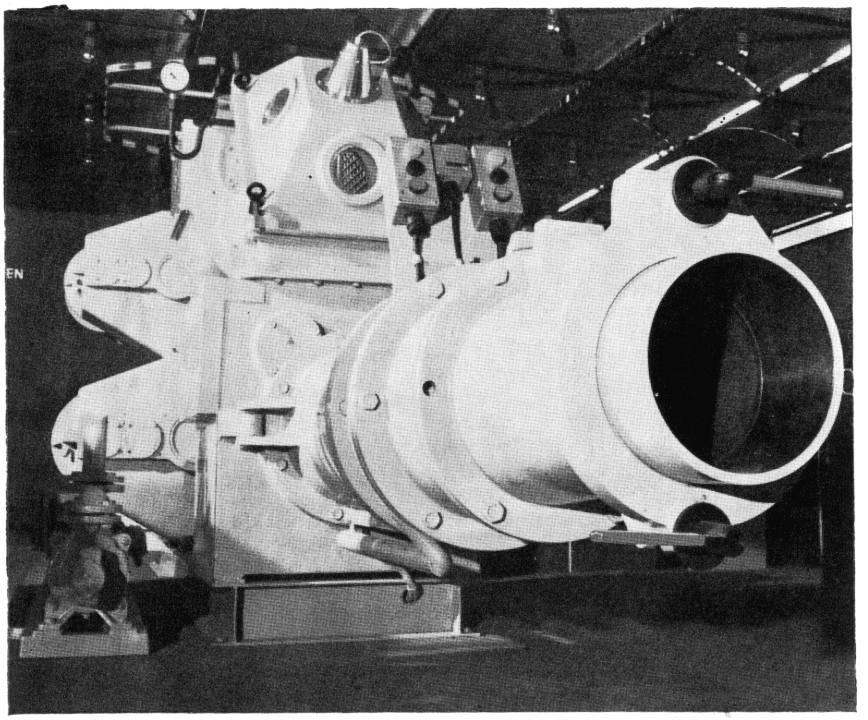


Bild III: Vakuumstrangpresse PVP 35 des VEB KEMA Görlitz, Betrieb des VEB Kombinat für Glas- und Keramikmaschinenbau

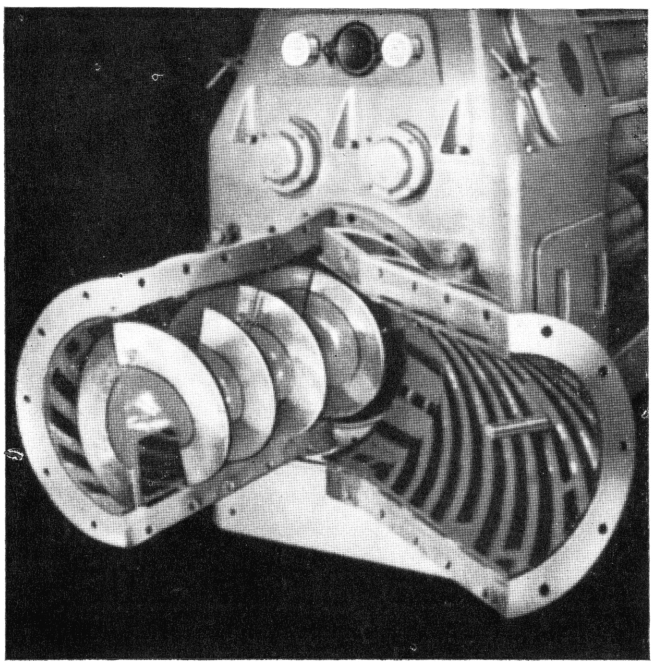


Bild IV:
Gestaltung von Schnecke und Zylinder der Vakuumaggregete „COMPACTA", Typen PZVA, der Fa. Karl Händle & Söhne GmbH & Co., KG, Mühlacker

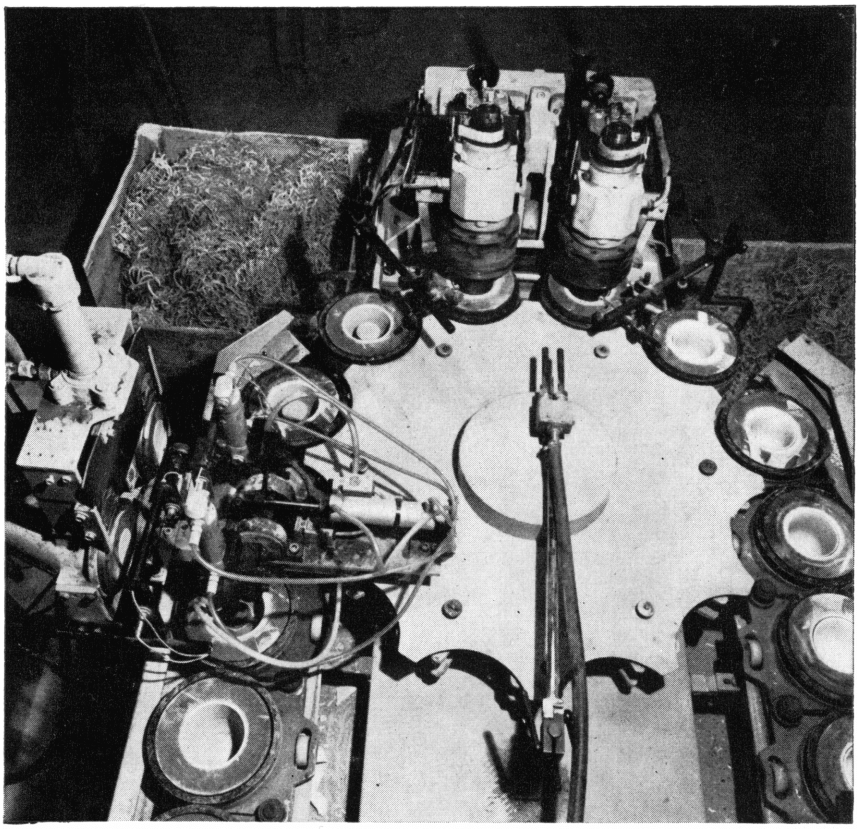


Bild V: Becherfließreihe Be 2; Bereich Ausformung mit Formentransportkette, Hebeleinlegevorrichtung und Rollerköpfen

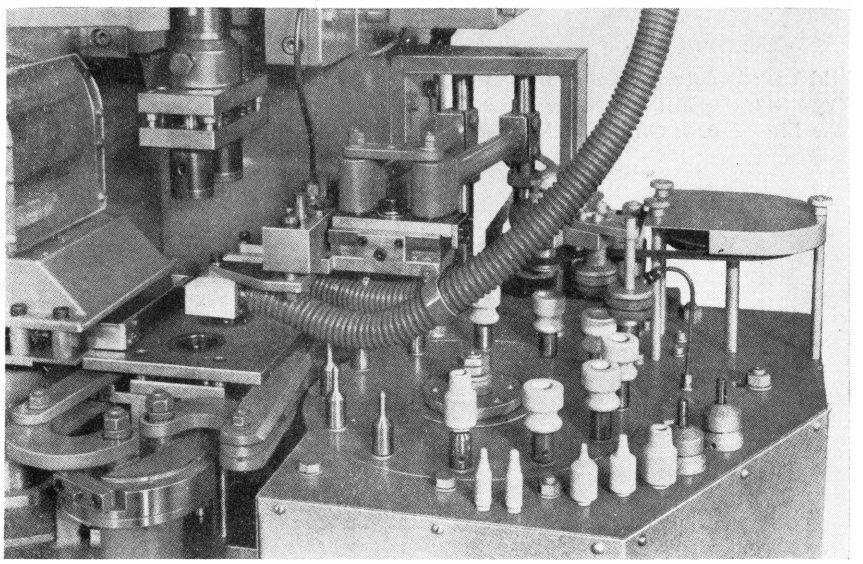


Bild VI: Kurvenpreßautomat KPA 5 mit Putztisch der Fa. Dorst - Keramikmaschinenbau, Kochel am See

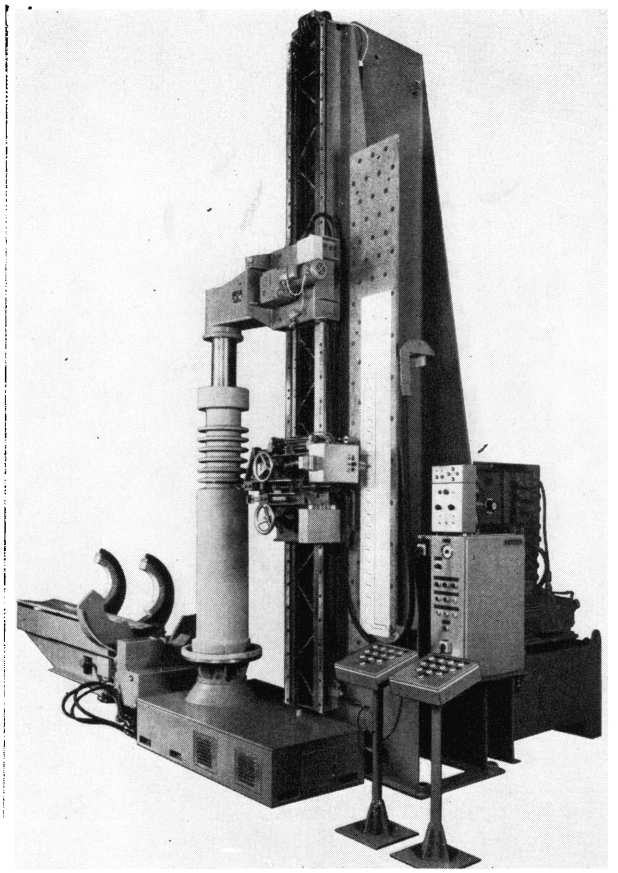


Bild VII: Isolatoren-Kopiermaschine, Type 542, der Fa. Gebrüder Netzsch, Maschinenfabrik GmbH & Co., Selb

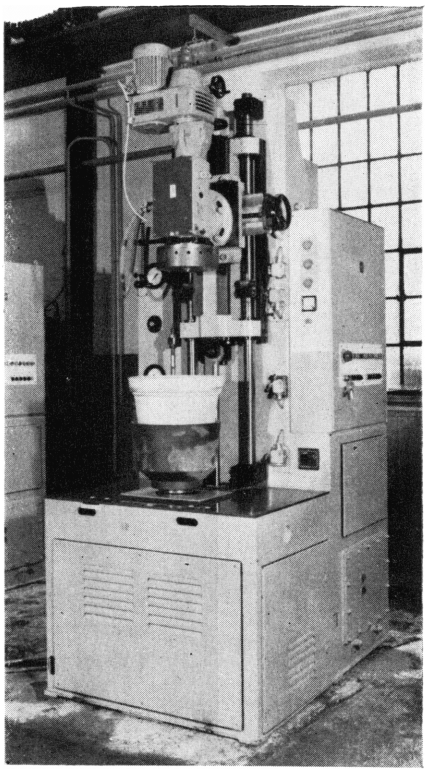


Bild VIII: Drehmaschine für Großgeschirr DG 1 des VEB Thuringia Sonneberg, Kombinat für Glas- und Keramikmaschinenbau

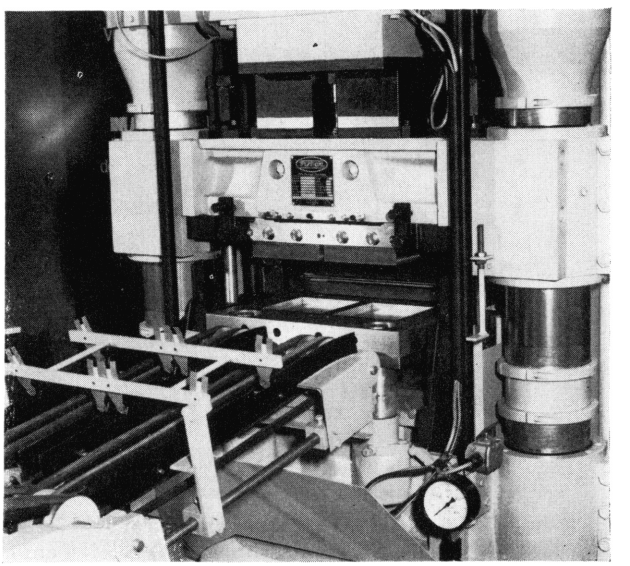


Bild IX: Fliesenpresse PY 250 des VEB Thuringia Sonneberg, Kominat für Glas- und Keramikmaschinenbau

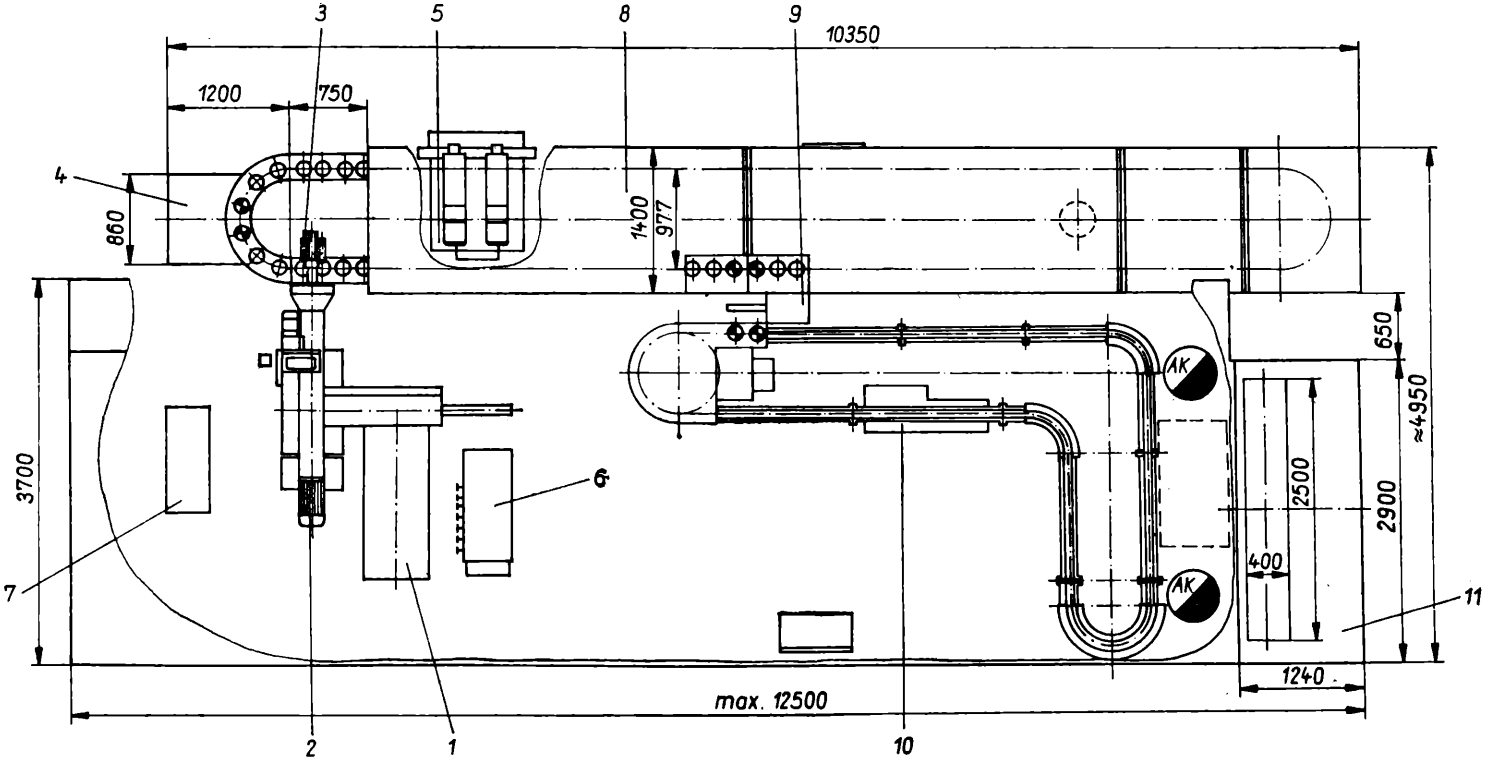


Bild 4.35. Becherfertigungslinie Be 2-L [215]

1 Masseaufgabeband, *2* Vakuumpresse, *3* Hubeleinsetzvorrichtung, *4* Maschinenkopf-Ausformstation, *5* Zentrale Vakuumerzeugung, *6* Hydraulikschrank, *7* elektrische Steuerung, *8* Lederharttrockner, *9* Umsetzer, *10* Verputzmaschine, *11* Weißtrockner

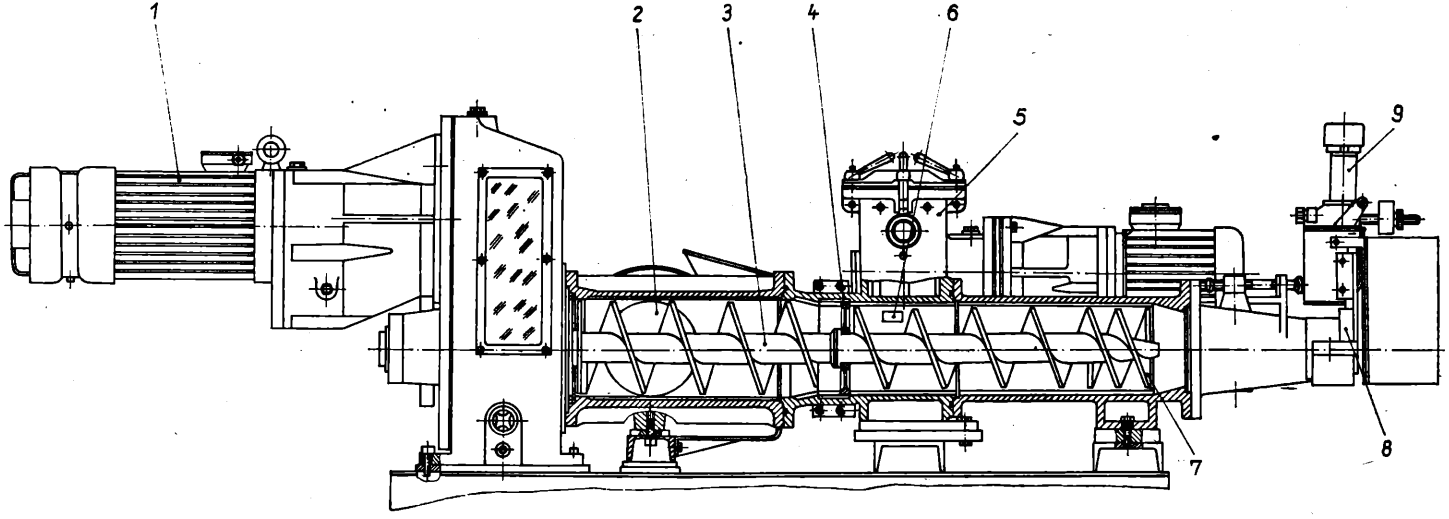


Bild 4.36. Vakuumpresse der Becherfließlinie Be 2-L [215]

1 Antriebsmotor, *2* Massezuführung, *3* Schnecke, *4* Schlitzplatte, *5* Vakuumkammer, *6* Einräumerwalze, *7* Endmesser, *8* Doppelpreßkopf, *9* Abschneiderzylinder

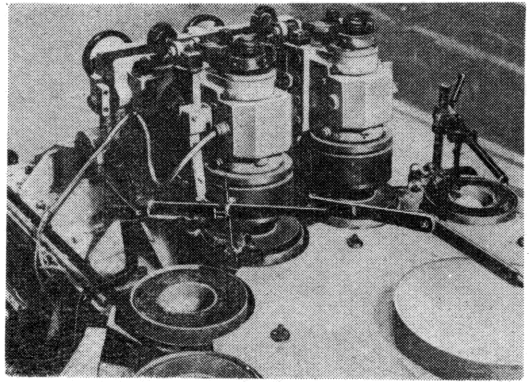


Bild 4.37. Ausformstation der Becherfließlinie Be 2-L [215]

einen Schnell- und einen Ausformhub unterteilt werden. Die Ausformstation ist mit einer Rückzugsvorrichtung ausgerüstet, durch die die Rollerköpfe horizontal verschoben werden können. Die Rollerwerkzeuge werden bei der Becherfertigung im allgemeinen nicht beheizt und besitzen auch keinen eigenen Antrieb. Bei der Fertigungslinie Be 2-L werden die Roller durch Reibkräfte von der Spindel in Drehbewegung versetzt, wobei zur Regulierung der Drehzahl noch eine mechanische Bremse am Ende der Rollerwelle angeordnet ist.

Während der Ausformung hält Vakuum die Formen in den Spindelaufnahmen. Vakuum wird auch für die Schneckenpresse, die Hubeleinlegevorrichtung und den Umsetzer vom Lederharttrockner zum Kettenband benötigt. Zur Erzeugung des Vakuums ist die Linie mit einer zentralen Vakuumanlage mit Wasserringpumpen ausgerüstet.

Nach der Ausformung, bei der die überschüssige Masse durch Abschneider beseitigt wird, gelangen die eingeformten Artikel in den Lederharttrockner.

Ist die Herstellung von Bechern mit festoniertem Rand vorgesehen, kann die Anlage mit einer entsprechenden Vorrichtung ausgerüstet werden. Die *Festonierung* des Bordes erfolgt durch Ausstechen der gewünschten Form mit Schneidwerkzeugen im plastischen Zustand des Formlings. Bei der Be 2-L ist die Vorrichtung einen Takt vor Eintritt der Artikel in den Lederharttrockner angeordnet. An dieser Stelle befinden sich zentrisch über den Formen zwei Schneidvorrichtungen. Die Formen werden aus den Aufnahmen der Kette in die Arbeitsstellung gehoben, so daß die Schneidwerkzeuge den Bord entsprechend ihrer Form von innen ausstechen können. Die Bewegung der Schneidwerkzeuge ist pneumatisch gesteuert und durch Anschläge begrenzt. Befinden sich die Schneidwerkzeuge in ihrer äußersten Stellung, werden die Formen abgesenkt und die abgetrennten Massestücke aus der Form ausgetragen. Durch Druckluft erfolgt die Entfernung der Massestücke von den Schneidwerkzeugen. Mit der beschriebenen Arbeitsweise der Vorrichtung ist es möglich, festonierte Becher mit der gleichen Durchsatzleistung, der gleichen Produktivität und dem gleichen Formensatz wie Becher mit glattem Rand herzustellen. Die Vorrichtung kann in den automatischen Ablauf von Taktstraßen eingeschlossen werden, erfordert bei der Bedienung keine besonderen Kenntnisse, ist leicht einstell- sowie umrüstbar und ermöglicht so eine flexible Produktion.

Der Einlauf der Formen in den Lederharttrockner ist mit einem Sicherheitsschalter versehen, der bei nicht exakt in der Aufnahme sitzenden Formen anspricht und damit Havarien im Bereich der Düsen des Trockners verhindert. Im Trockner werden die Formlinge 3,5 bis 4,0 min lang intensiv mit Heißluft beaufschlagt.

Nach dem Umsetzen der Artikel auf das Kettenband erfolgt die Rücktrocknung der Gipsformen bzw. eine Erwärmung der Kunststofformen, um beim nächsten Trocknerdurchlauf ebenfalls ein sicheres Ablösen der Artikel von den Formen zu gewährleisten.

In der Transporteinrichtung des Lederharttrockners befinden sich 96 Formen im Umlauf. Das Kettenband, auf das die lederharten Becher mit einem hydraulisch gesteuerten Umsetzer befördert werden, besitzt in der Grundvariante 74 drehbare Aufnahmen. Durch das Kettenband werden die Artikel zu der entsprechend den örtlichen Gegebenheiten angeordneten Putzmaschine transportiert. Das Verputzen des Becherrandes erfolgt durch mit Wasser befeuchtete Schwammbänder bei gleichzeitiger Rotation der Becher. Bei festonierten Bechern ist es notwendig, die Drehrichtung der Aufnahmen während des Putzvorganges zu ändern.

Nach dem Verputzen schließt sich im technologischen Arbeitsablauf das Garnieren der Henkel an. Diese Tätigkeit wird in vielen Fällen noch manuell durchgeführt. Durch den Einsatz von Henkelgarniermaschinen und entsprechenden Verkettungs- und Umsetzeinrichtungen zu einem Weißtrockner ist eine vollautomatische Becherfertigung möglich.

Das beschriebene Anlagenkonzept der Be 2-L findet auch mit z. T. größeren Teilungen der Formenkette und größeren Formenzahlen bei Fertigungslinien für Schalen, Teller, Bomse und kleine Schüsseln Anwendung.

Tabelle 4.12 enthält die technischen Daten der Becherfertigungslinie Be 2-L.

Tabelle 4.12. Technische Daten der Becherfertigungslinie Be 2-L [215]

Durchsatzleistung, max.	1200 Stück/h
bei Hotelbechern mit einer Masse von ≦400 g	800 Stück/h
Massefeuchte	20...21 %
Anzahl der Ausformspindeln	2 Stück
Drehzahl der Ausformspindeln	1000; 1200 min^{-1}
Arbeitsformendurchmesser	170 mm
Anzahl der Formenaufnahmen	96 Stück
Trockenzeit im Lederharttrockner	3,5...4 min
installierte Leistung	35 kW
Wärmebedarf, max.	251400 kJ h^{-1}
Beheizung (wahlweise)	Dampf, Heißwasser
Hauptabmessungen	
Länge	10350 mm
Breite	4950 mm
Höhe	2000 mm
Masse	6800 kg

4.2.2.3. Großgeschirrfertigungsanlagen Typ FH1 und FF1

Die Fertigungsanlagen FH1 und FF1 des VEB Thuringia Sonneberg, Kombinat für Glas- und Keramikmaschinenbau, dienen der Herstellung von weißgetrocknetem Großgeschirr aus Porzellan-, Steingut- und anderen keramischen Massen im Einform- oder Überformverfahren.
Die lose verketteten Hauptgruppen der Fertigungslinien sind

- die Drehmaschine für Großgeschirr DG 1 mit automatischem Formenumsetzer,
- der Lederharttrockner und
- der Weißtrockner.

Mit den Hauptgruppen ist die Fertigung von Großgeschirr mit manueller Masseaufgabe auf die Arbeitsformen und manuellem Umsetzen der Artikel zwischen Lederhart- und Weißtrockner möglich. Anlagen dieser Ausführung werden vor allem für die Fertigung von Hohlgeschirr eingesetzt, da hier in vielen Fällen das manuelle Putzen und Garnieren der Artikel zwischen Lederhart- und Weißtrockner technologisch eingeordnet wird.
Zur weiteren Automatisierung des Fertigungsprozesses können die Anlagen durch die Gruppen

- Masseblattfertigungsanlage mit Blattumsetzer bzw. alternativ mit einer Blattdosieranlage mit oder ohne Blattquetsch- und -übertragungseinrichtung,
- Umsetzeinrichtung zwischen Lederhart- und Weißtrockner sowie
- Abkippvorrichtung für Massereste

komplettiert werden.
Eine derartige Anlage zur Herstellung von Geschirr im Überformverfahren vom Typ FF1 zeigt Bild 4.38 (s. Beilage).
Die Anlage dient der Herstellung von Schüsseln, Tellern und Platten mit glattem oder festoniertem Rand bei einem maximalen Gipsformendurchmesser von 400 mm und einer maximalen Formenhöhe von 120 mm. Die Leistung beträgt bei Platten von 32 cm Durchmesser 2 × 200 Stück/h (weitere technische Daten s. Tabelle 4.13).
Durch die beiden getrennten Palettentransporteinrichtungen des Lederharttrockners (*3*) werden die Arbeitsformen periodisch zur Abkippstation, zur Masseblattaufgabe (*2*), zum automatischen Formenumsetzer (*4*) und – nachdem sie den Lederharttrockner durchlaufen haben – zum Umsetzer zwischen Lederhart- und Weißtrockner (*6*) bewegt. Die Paletten werden durch an Ketten befestigte Mitnehmerleisten über Rollenbahnen geschoben. Im Lederharttrockner sind je Fördersystem 36 × 3 Paletten nebeneinander angeordnet. Einschließlich der Paletten auf den Längsbändern und den Ein- und Austragsbändern befinden sich 2 × 121 Stück im Umlauf.
An den Längsbändern ist je eine pneumatisch gesteuerte Abkippvorrichtung angeordnet. Durch diese Vorrichtung entfernt man Massereste und Bruch, der besonders beim Einfahren der Gipsformen anfällt, automatisch von diesen. Die jeweilige Form wird dabei durch zwei Backen formschlüssig erfaßt, von der Palette gehoben, um 120° geschwenkt und wieder auf die Palette zurückgesetzt. Es schließt sich der Transport der Paletten mit den gereinigten Formen zur Masseblattfertigungsanlage an.
Die *Masseblattfertigungsanlagen* (s. Bild 4.39) dienen der Herstellung von gequetschten Masseblättern bestimmter Größe und deren automatischer Aufgabe auf die Arbeitsformen durch den Masseblattumsetzer. Sie bestehen aus je einem Puffer- und einem Einschubband, einer Vaku-

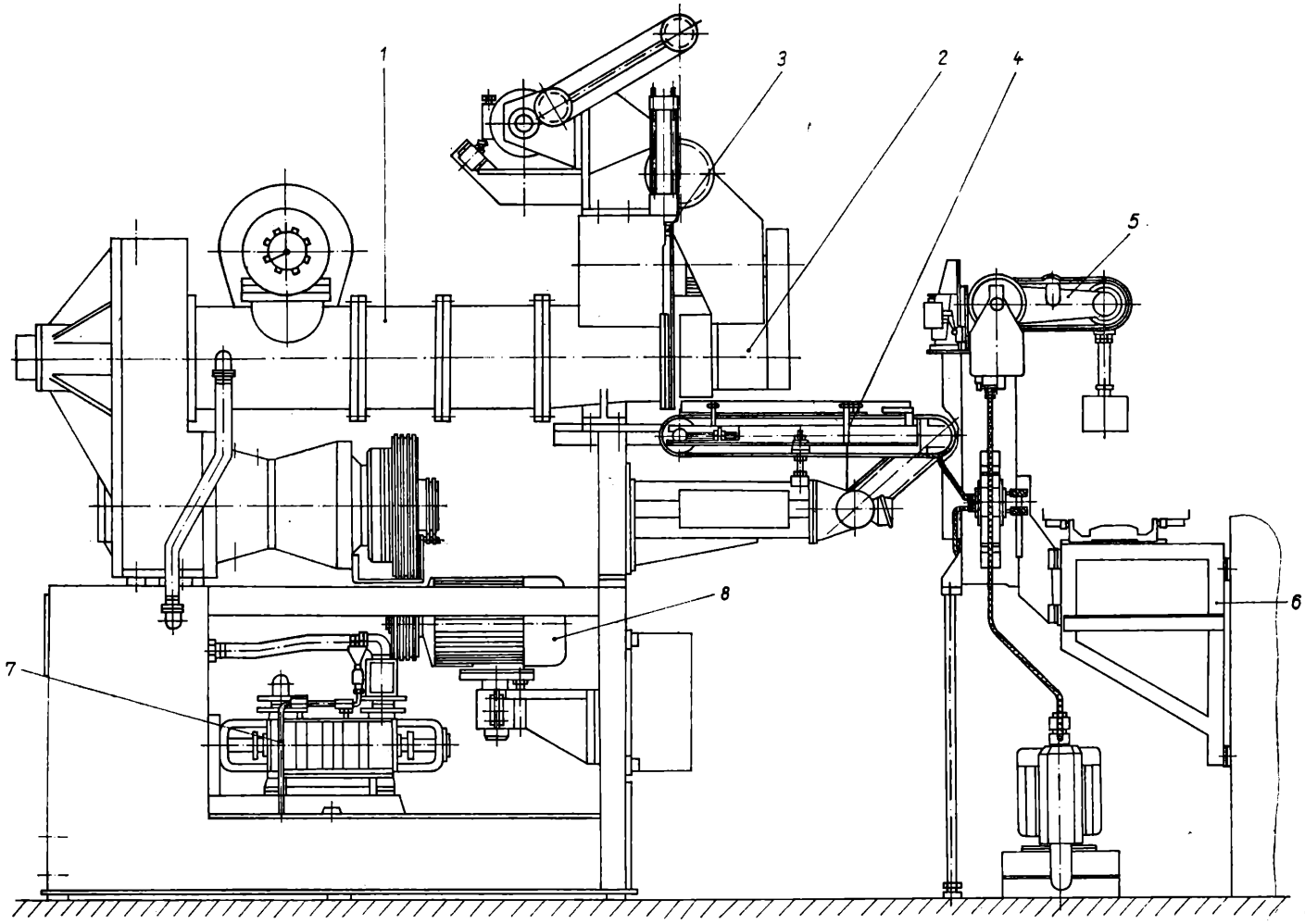


Bild 4.39. Masseblattfertigungsanlage für die Großgeschirrfertigungslinie FF 1 [215]

1 Vakuumpresse, *2* Blattquetsche, *3* Abschneider, *4* Zentrierband, *5* Blattumsetzer, *6* Längsband des Lederharttrockners, *7* Vakuumpumpe, *8* Antriebsmotor

Tabelle 4.13. Technische Daten der Großgeschirrfertigungsanlage für Flachgeschirr im Überformverfahren, Typ FF 1 [215]

Leistung	2 × 240 Stück/h brutto Teller 26 cm ∅ 2 × 200 Stück/h brutto Platten 32 cm ∅
Gipsformendurchmesser, max.	400 mm
Gipsformenhöhe, max.	120 mm
Gipsformbiegefestigkeit, notwendige	≧7 MPa
Massefeuchtigkeit	23 ± 1 %
Feuchtigkeitsgehalt nach Lederharttrocknung	etwa 16 %
Feuchtigkeitsgehalt nach Weißtrocknung	≦2 %
Gesamtanschluß	etwa 123 kW
Betriebsspannung	380 V, 50 Hz
Steuerspannung	220 V
Beheizung, wahlweise	Heißwasser 140 °C/90 °C Dampf 0,3...0,6 MPa
Druckluftverbrauch	28 $m^3 h^{-1}$
erforderlicher Druck	0,6 MPa
Kühlwasser	0,3 $m^3 h^{-1}$
Artikelgewicht, naß, max.	1250 g
Masseblattfertigung	
Hubeldurchmesser	150 mm
Hubellänge	max. 500 mm
Pufferzeit je Seite	etwa 50 min (bei max. 240 Stück/h)
installierter elektrischer Anschlußwert	32 kW
Kühlwasseranschluß	0,2 $m^3 h^{-1}$
Druckluftanschluß	0,6 MPa
Druckluftverbrauch	3 $m^3 h^{-1}$
Länge	3550 mm
Breite je Seite	3450 mm
Höhe	2440 mm
Lederharttrockner mit Palettentransport	
installierte Wärmeenergie	4 × 90 MJ h^{-1}
installierter elektrischer Anschlußwert	18,6 kW
Anzahl der im Umlauf befindlichen Formen	2 × 121 Stück
Verweilzeit im Trockner bei 2 × 240 Stück/h	etwa 27 min
Palettenabmessungen, max.	415 mm × 415 mm
Palettenstärke	19 mm
Länge	17200 mm
Breite	4200 mm
Höhe	2700 mm
Weißtrockner für Großgeschirr	
Leistung je nach Artikel, max.	480 Stück/h
Artikeldurchmesser, max.	390 mm
Artikelhöhe, max.	230 mm
installierter elektrischer Anschlußwert	32 kW
installierte Wärmeenergie	754 MJ h^{-1}
Verdampfleistung	110 kg h^{-1}
Länge	etwa 18500 mm
Breite mit Laufsteg	etwa 4600 mm
Höhe	etwa 4920 mm

umpresse (*1*), der Blattquetscheinrichtung (*2*), dem Abschneider (*3*), einem Förderband mit Zentrierleisten (*4*) und dem Umsetzer (*5*) für die Masseblätter.

Die Pufferbänder der beiden Masseblattfertigungsanlagen werden manuell mit Massehubeln von 150 mm Durchmesser und einer Länge von maximal 500 mm besetzt. Die Pufferzeit je Band beträgt bei einer Leistung von 240 Stück/h etwa 50 min. Alle weiteren Fertigungsschritte bis zur Abnahme des Rohlings vom Weißtrockner werden von der Anlage selbsttätig ausgeführt, so daß sich der Anlagenfahrer in der Zwischenzeit der Kontrolle und Einstellung der Maschinenfunktionen widmen kann.

Die auf das Pufferband aufgelegten Hubel werden über eine Lichtschrankensteuerung auf das Einschubband gegeben und der Einzugschnecke der Vakuumpresse zugeführt. Die entlüftete Masse tritt aus dem Mundstück der Preßschnekke, die zur Einzugschnecke in einem Winkel von 90° und unterhalb dieser angeordnet ist, aus und wird durch eine rotierende Messerscheibe gequetscht. Die Geometrie der entstehenden Masseblätter kann durch die Auswahl des Mundstückdurchmessers, die Verstellung der Fotozelle und der Messerscheibe variiert werden. Nach dem Abschneiden fällt das jeweilige Blatt auf ein Förderband mit Zentrierleisten, so daß die Masseblätter durch den Umsetzer stets zentrisch auf die Arbeitsformen aufgesetzt werden.

Alternativ für die Masseblattfertigungsanlage mit Vakuumdosierpresse kann eine rechnergesteuerte *Blattdosieranlage* BD 1, bei Bedarf in Verbindung mit einer Blattquetsch- und -übertragungseinrichtung BQ 1, eingesetzt werden. Die Blattdosieranlage (Bild 4.40, Tabelle 4.14) dient der Herstellung von Masseblättern aus gezogenen und evakuierten Hubeln ohne Anfall von Reststücken. Sie ist als Verkettungselement

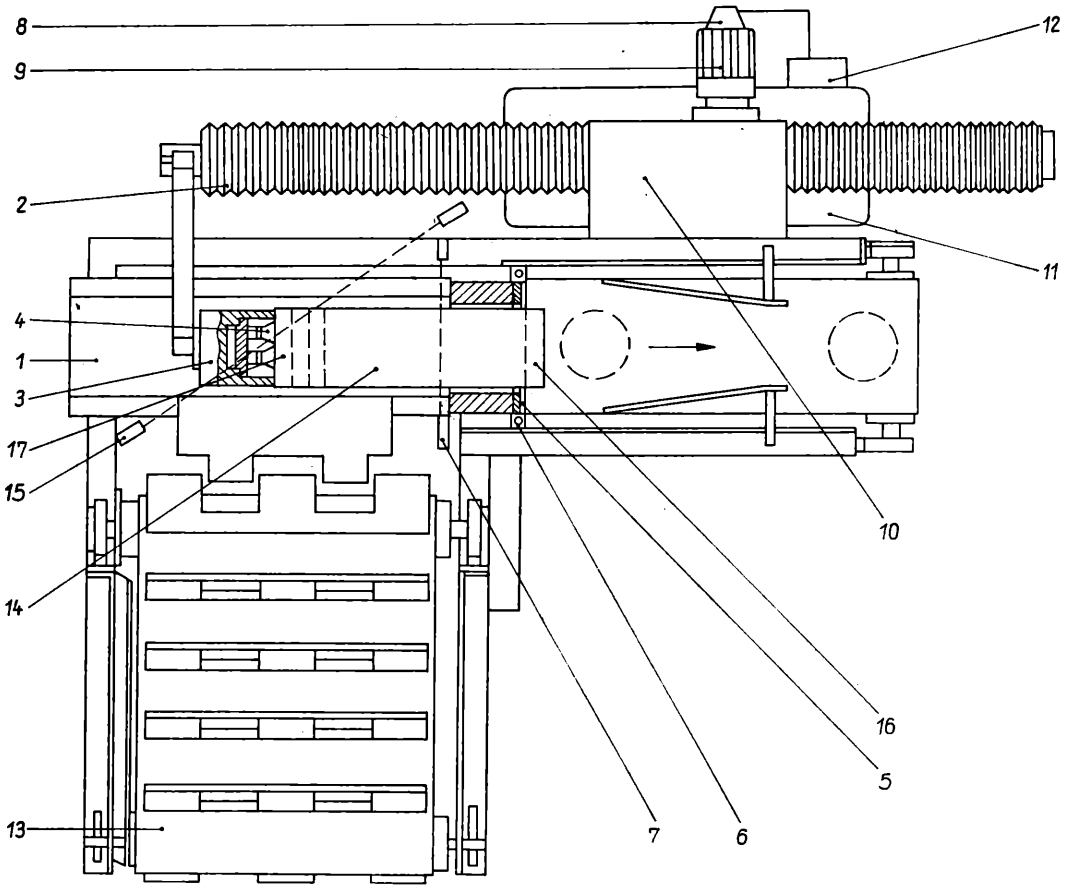


Bild 4.40. Blattdosieranlage BD 1 (Draufsicht) [215]

1 Trog, *2* Linearbaugruppe, *3* Druckstück, *4* Vakuumsauger, *5* Drahtabschneider, *6* Führungsschiene, *7* Lichtschranke, *8* inkrementales Wegmeßsystem, *9* Motor, *10* Positionierantrieb, *11* Rechnersteuerung, *12* Rechnersteuerung-Ausgang, *13* Pufferband-Beschickungsband, *14* Hubel, *15* Lichtschranke, *16* erstes Masseblatt, *17* letztes Masseblatt

in Taktstraßen für Hohl- und Flachgeschirr sowie als automatische Beschickungseinrichtung für Einzelmaschinen einsetzbar.

Die Hubelauflage erfolgt auf ein Bevorratungsband (*13*), wobei die Hubellänge bis auf die Einhaltung einer maschinenbedingten maximalen Länge ohne Bedeutung ist. Anschließend werden die Hubel automatisch nacheinander in einen muldenförmigen Trog (*1*) gegeben und durch einen elektromechanischen Linearvorschub (*2*) in Richtung Abschneider (*5*) verschoben.

Während des Vorschubes erfolgt eine Messung der Hubellänge, die in einen Rechner (*11*) eingegeben wird. Dieser errechnet in Abhängigkeit vom vorgewählten Sollwert für die Blattstärke die Anzahl der Masseblätter je Hubel, teilt den anfallenden Rest auf die einzelnen Blätter und gibt die korrigierten Sollwerte dem Linearvorschub vor.

Nach Abschnitt des vorletzten Blattes wird das letzte Blatt (*17*) mittels Vakuums (*4*) an einem Druckstück (*3*) gehalten und dann durch Druckluft abgestoßen. Mit dem Einlegen des nächsten Hubels beginnt der folgende Arbeitszyklus. Es können zwei verschiedene Blattstärken im Wechsel nacheinander vom Hubel geschnitten werden.

Die geschnittenen Massescheiben fallen auf ein Transportband und gelangen je nach den technologischen Bedingungen direkt vom Band oder

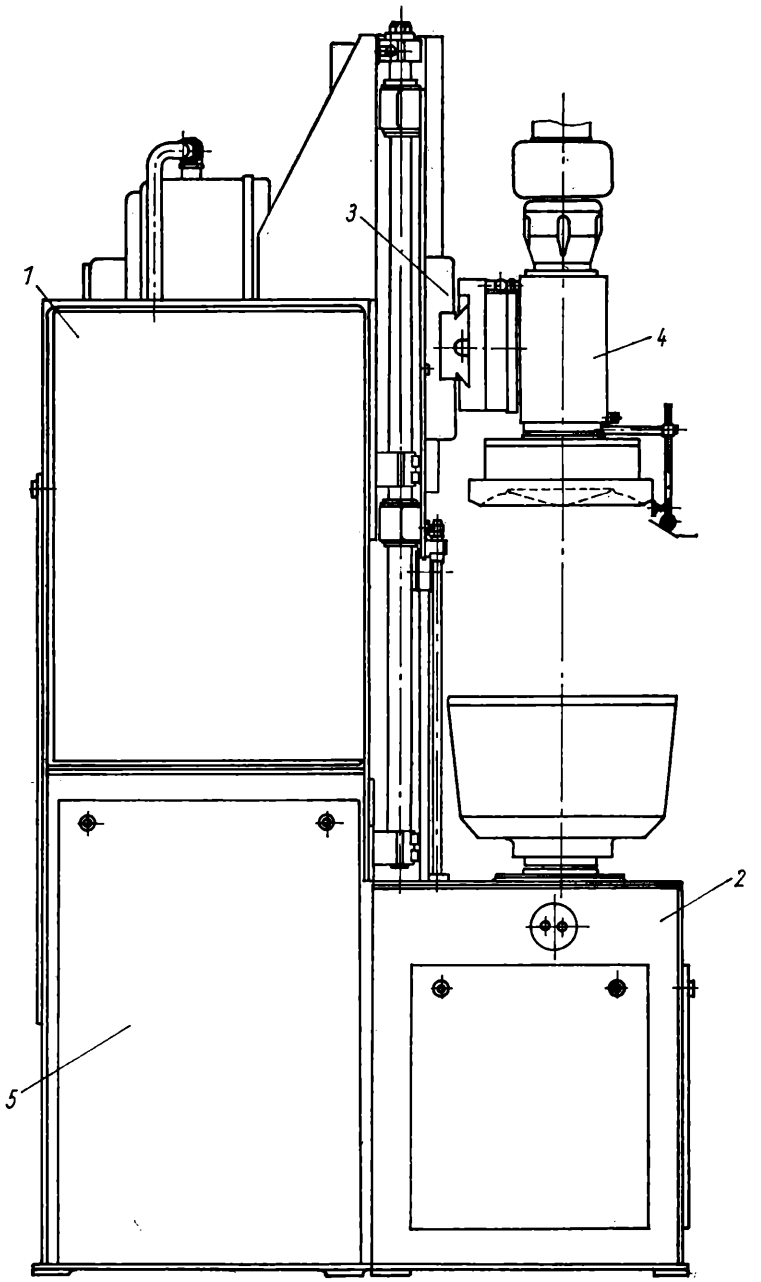


Bild 4.41. Schematischer Aufbau der Drehmaschine DG 1 [215]

1 Maschinenständer, *2* Ausformstation, *3* Vertikalschlitten, *4* Roller, *5* Hydraulik

durch die Blattquetsch- und -übertragungseinrichtung BQ 1 auf die Form.

Durch Anheben des Transportbandes wird je eine durch Führungsleisten und fotoelektrische Initiatoren exakt positionierte Massescheibe dem vierteiligen *Quetschstern* übergeben. Die Massescheiben bzw. -blätter werden dabei durch Vakuum an den Aufnahmeflächen der Quetschscheibe von oben gehalten. Durch Weiterdrehung des Quetschsterns um 90° befindet sich

Tabelle 4.14. Technische Daten der Blattdosiereinrichtung BD 1 [215]

Leistung je nach Einsatzfall und gewählter Blattstärke, max.	1400 Blatt/h
Hubeldurchmesser	≦190 mm
Hubellänge	≦520 mm
Sollwert für Blattstärke, wählbar mit Abstufung von	1 mm
Blattstärkenabweichung vom Sollwert bei 20 mm Blattstärke	± 0,5 mm
installierte Leistung mit Vakuumpumpe	2,5 kW
Hubelbevorratung	10 Hubel

dann die Massescheibe über dem rotierenden Quetschmesser und wird breitgequetscht sowie geglättet. Es schließen sich zwei weitere Drehbewegungen von 90° an. Dadurch erfolgt eine Positionierung des Masseblattes genau über der Arbeitsform auf dem Längsband. Dort wird das Vakuum abgeschaltet und die fertig ausgequetschte und geglättete Massescheibe durch Preßluft auf die Gipsform abgestoßen. Ein weiterer Arbeitstakt bringt die Quetschscheibe wieder in Ausgangsstellung über das Transportband.

Die Arbeitsformen mit den Massescheiben bzw. -blättern werden zum *Formenumsetzer* befördert. Der Formenumsetzer steht zwischen dem Längsband des Lederharttrockners und der Drehmaschine DG 1. Er dient zum Umsetzen der Gipsformen von den Paletten des Längsbandes zur Ausformspindel der Drehmaschine. Mit Greiferarmen erfolgt bei jedem Arbeitstakt an der Übergabestelle das Abheben einer Gipsform mit Masseblatt von der Palette auf dem Längsband und der überdrehten Gipsform (Gipsform mit Rohling) vom Ausstoßer der Ausformspindel.

Nach einer Schwenkbewegung um 180° wird die Gipsform mit Masseblatt auf den Ausstoßer und die überdrehte Form auf die Palette abgesenkt. Anschließend endet mit dem Öffnen der Greiferarme der Arbeitstakt des Umsetzers, und der automatische Ablauf an der Drehmaschine beginnt.

Sämtliche Bewegungen – Schwenken, Anheben und Absenken sowie Öffnen und Schließen der Greiferarme – werden hydraulisch ausgeführt. Der Formenumsetzer ist an das Hydraulikaggregat der Drehmaschine angeschlossen.

Die Drehmaschine DG1 (Bild 4.41 und Tabelle 4.15) besteht aus den Baugruppen

- Maschinenständer (*1*),
- Ausformspindel mit Formenausstoßer,
- Rückzugvorrichtung,
- Vertikalschlitten (*3*) mit Rollerwerkzeug (*4*),
- hydraulische Einrichtung (*5*).

Der Maschinenständer ist eine stabile Schweißkonstruktion. In ihm sind die hydraulische Steuereinheit und die Ausformstation (*2*) (Ausformspindel mit Formenausstoßer und Rückzugvorrichtung) untergebracht. Die Drehzahl der Spindel läßt sich in Stufen einstellen und wird elektrisch gesteuert. Der Rückzug beträgt maximal 63 mm.

Tabelle 4.15. Technische Daten der Drehmaschine DG 1 [215]

Leistung je nach Artikel, max.	300 Stück/h
Gipsformendurchmesser, max.	450 mm
Formenhöhe, max.	340 mm
Vertikalhub, Roller, max.	630 mm
Horizontalhub, Rückzug, max.	63 mm
Drehzahl der Spindel (in Stufen)	200...600 min^{-1}
Drehzahl des Rollers (stufenlos)	90...510 min^{-1}
installierte Leistung	9,7 kW
Abmessungen	
Länge	1450 mm
Breite	1050 mm
Höhe	2470 mm
Masse	2500 kg

Die technische Ausführung der Ausformspindel und des Rollerkopfes bestimmen in großem Maße die Qualität der auf Rollermaschinen gefertigten Artikel. Bild 4.42 zeigt die *Spindel* (*5*) mit *Formenausstoßer* (*7* und *3*). Der *Roller* (*1*), Bild 4.43, mit *Abschneider* (*2*) ist am Vertikalschlitten (*3*), s. Bild 4.41, welcher in wälzgelagerten Rundführungen läuft, befestigt. Der Vertikalhub beträgt maximal 630 mm und wird – wie der Rückzug – hydraulisch gesteuert. Während des Formgebungsprozesses läuft der Vertikalhub im Schleichgang ab. Der Vertikalschlitten ist mechanisch mit dem Formenausstoßer gekoppelt, so daß sich beim Absenken des Rollerkopfes auch die Arbeitsform in die Aufnahme absenkt. Die Drehbewegung des Rollerkopfes wird elektrisch gesteuert. Durch den Einsatz eines verstellbaren Getriebemotors ist es mög-

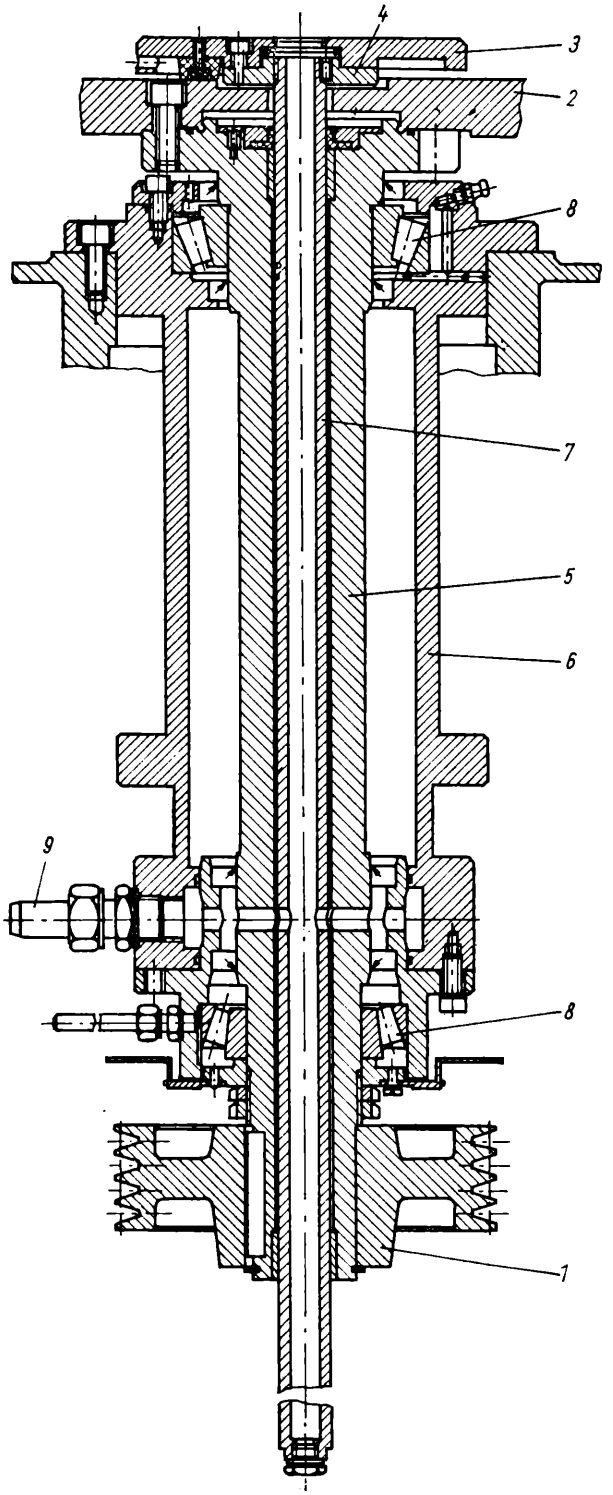


Bild 4.42. Spindellagerung der Drehmaschine DG 1 [215]

1 Keilriemenscheibe, *2* Formenaufnahme, *3* Ausstoßer, *4* Zentrierring, *5* Spindel, *6* Spindelgehäuse, *7* Ausstoßstange, *8* Kegelrollenlager, *9* Stutzen für Vakuum

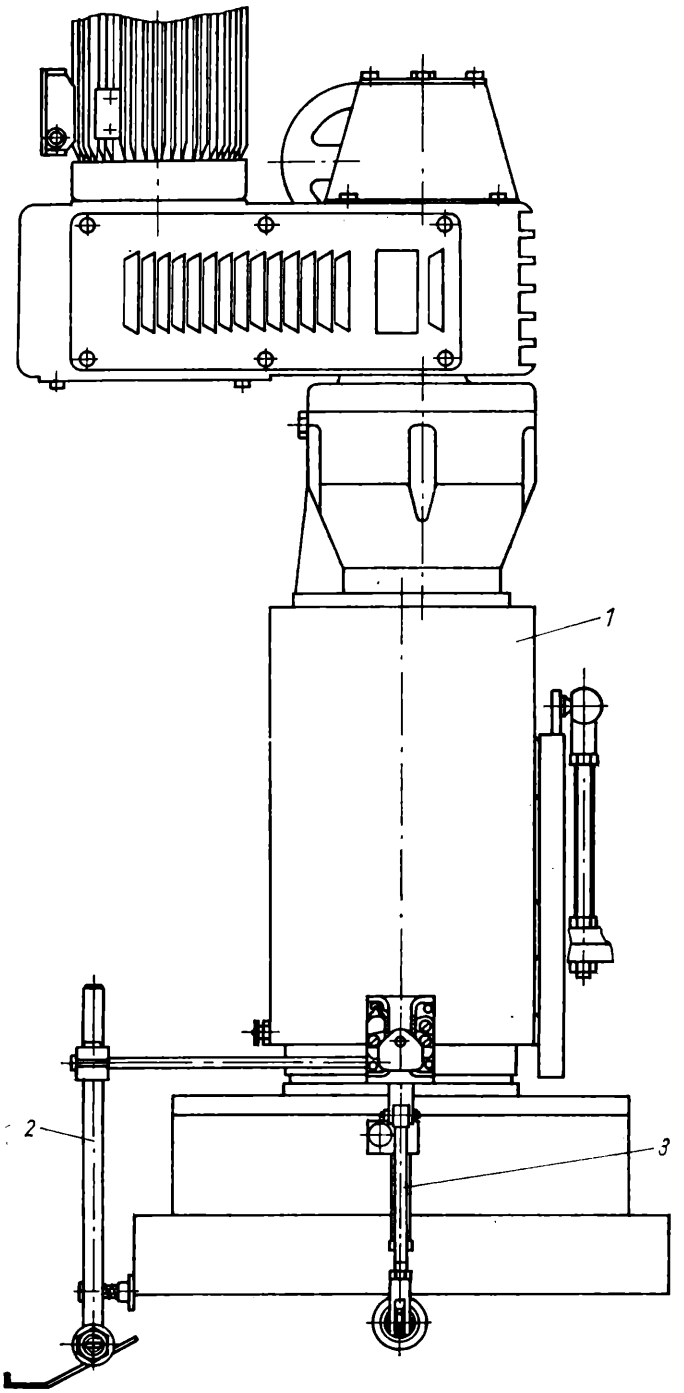


Bild 4.43. Roller der Drehmaschine DG 1 mit einstellbarer Neigung [215]

1 Roller, *2* Abschneider, *3* Falzdrückeinrichtung

lich, die Drehzahlen im Bereich von 90 bis 510 min^{-1} stufenlos einzustellen. Der Rollerkopf wird elektrisch mit einer maximalen Leistung von 4,5 kW beheizt. Die Rollerkopftemperatur ist ebenfalls stufenlos regelbar.

Die Ausformung läuft folgendermaßen ab:

Die vom Formenumsetzer auf dem Ausstoßer der Ausformspindel aufgesetzte Form senkt sich in die Aufnahme ab. Die Spindel wird in Drehung versetzt, und der Rollerkopf gelangt in seine untere Endstellung. Während des Rollens wird die Form durch Vakuum in der Formenaufnahme gehalten. Nach beendeter Ausformung fährt der Rollerkopf nach oben, und der Ausstoßer hebt die überdrehte Form (Gipsform mit Rohling) in Übergabestellung. Vom Längsband des Lederharttrockners gelangen die überdrehten Formen dann zum Eintragband und von dort, jeweils 3 Paletten gleichzeitig, in den Trockner. Die Artikel werden im *Lederharttrockner* über Düsen mit Warmluft beaufschlagt, deren Temperatur und Geschwindigkeit durch

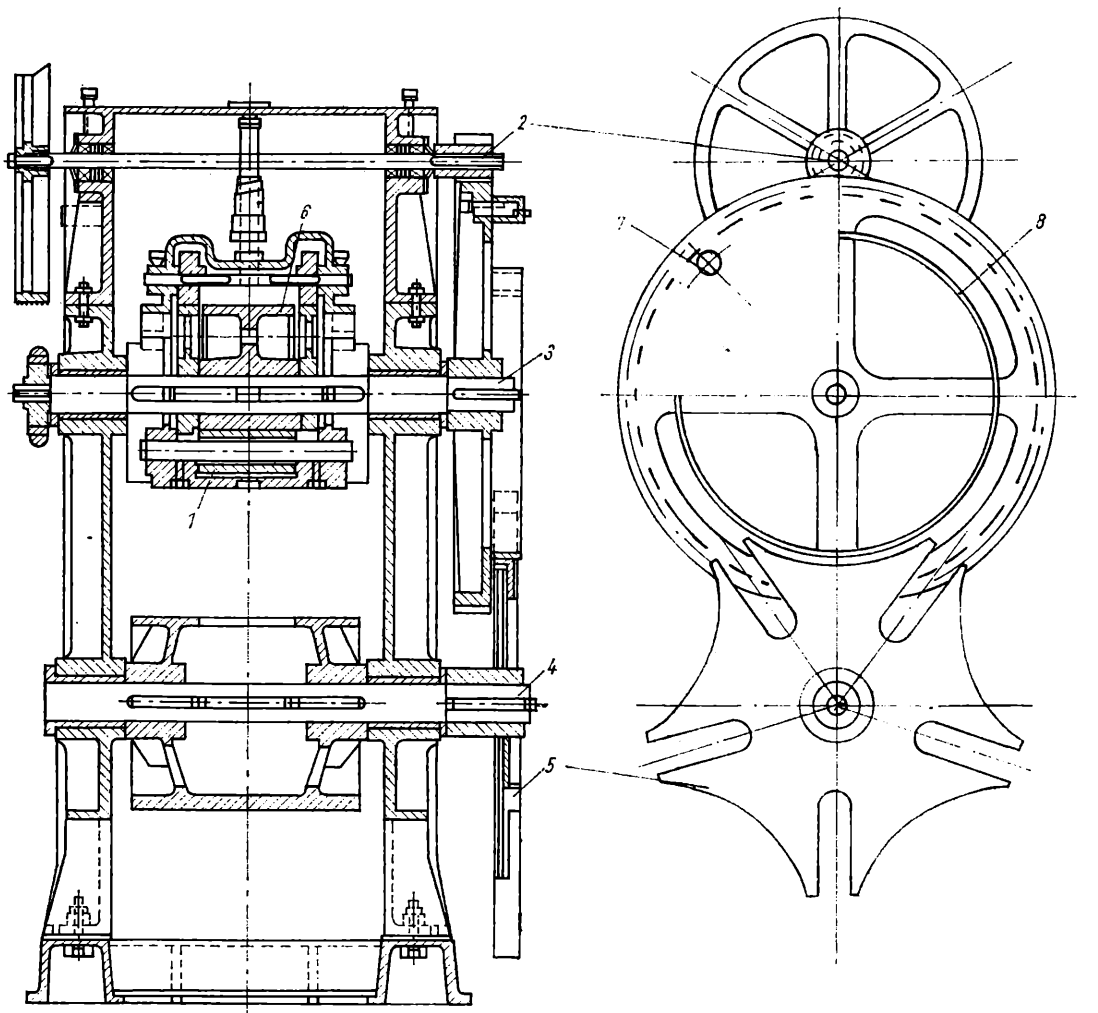


Bild 4.44. Prinzipieller Aufbau einer Revolverpresse nach [132]

1 Oberform, *2* Antriebswelle, *3* Exzenterwelle, *4* Welle mit Unterform, *5* Malteserkreuz, *6* Exzenter, *7* Bolzen für Malteserkreuzantrieb, *8* Führungsbahn des Malteserkreuzes

zwei getrennte luft- und wärmetechnische Anlagen je Trocknerseite entsprechend den trocknungstechnischen Erfordernissen eingestellt werden können. Da weiterhin der Abstand zwischen den Düsen und den Artikeln verändert werden kann, ist es möglich, den Trocknungsverlauf in weiten Grenzen zu variieren.
Nach Durchlaufen des Lederharttrockners gelangen die Paletten zu den Austragbändern. In dieser Position erfolgt das Umsetzen von jeweils 6 Formlingen durch die automatische Umsetzvorrichtung in den *Weißtrockner*. Die Formlinge werden während des Umsetzvorganges durch Vakuum gehalten. Zur Unterstützung des Ablösens der Artikel von der Form drückt man durch Abblasringe Druckluft zwischen Formling und Form.
Nach dem Umsetzen der Artikel in den Weißtrockner werden die Transportpaletten mit den Arbeitsformen durch die Austragbänder vereinzelt und taktweise wieder auf die Längsbänder geschoben. Von hier durchlaufen sie erneut den beschriebenen technologischen Ablauf.

4.2.3. Nach- und Naßpressen

4.2.3.1. Vorbemerkungen

Neben einfachen Schlaghebelpressen und verschiedenen Spezialpressen, wie Kanalsteinpressen, Blumentopfpressen, hydraulischen RAM-Pressen und Spiralstempelpressen zur Fertigung von Isolatoren, kommen zur Nachformung bildsamer Massebatzen vor allem Exzenterpressen zur Anwendung.
Bei den zur Herstellung von Ofenkacheln, Ecken und Simsen dienenden Kachelpressen werden die Unterformen durch einen Exzenter gegen die Oberform gefahren.
Die für die Herstellung von Preßdachziegeln eingesetzten Revolverpressen arbeiten ebenfalls mit Exzenterwirkung. Den prinzipiellen Aufbau einer Revolverpresse zeigt Bild 4.44.
Auf einer Welle (*4*) befindet sich eine sich periodisch drehende Trommel mit fünf Aufspannflächen für die Unterformen. Auf jeder dieser Flächen können je nach Größe der Presse und der Artikel bis zu fünf Formenunterteile befestigt werden. Bei Stillstand der Trommel wird die Oberform (*1*) durch den Exzenter (*6*) gegen die Unterform bewegt und der zugeführte Batzen verpreßt. Die Oberform durchläuft dabei die Phasen:

- Vorpressung,
- Entlüftungshub und
- Endpressung.

Der Bewegungsablauf der Unterformtrommel wird durch ein Malteserkreuz (*5*) realisiert. Die Abnahme der Preßlinge erfolgt mit Hilfe von Rähmchen nach entsprechender Drehung der Unterformen.
Bei der Formgebung von plastischen Massen auf Pressen ist die Wahl des Formensystems und der Formungshilfsmittel für die Produktivität des Verfahrens und die Qualität der Erzeugnisse von besonderer Bedeutung. In [237] wird ein Überblick über die bei der Formgebung von Preßdachziegeln auf Revolverpressen eingesetzten Formensysteme gegeben:

Poröse Formen

Das Pressen von weichen Kuchen wird am günstigsten mit Formen bewerkstelligt, die einen Gipsbelag als Preßfläche haben. Durch die Möglichkeit, das Auspreßwasser aus der Gipsschicht der oberen Arbeitsform, in der meist die Ziegeloberseite gepreßt wird, abzusaugen, erzielt man exakt ausgepreßte Dachziegel. Für das Absaugen des Auspreßwassers sollte ein volles Vakuum zur Verfügung stehen. Der Nachteil von Formen mit Gipsbelag besteht in ihrer kurzen Standzeit infolge Abnutzung oder Ausbrechen des Belages. Um die Formen so schnell wie möglich zu wechseln, wurde eine hydraulische Oberformenbefestigung entwickelt. Man kann die Standzeiten erhöhen, wenn man kunststoffgebundene Hartgipse verwendet.
Es gibt Bestrebungen, mit kunststoffgebundenen abriebfesteren Stoffen gipsformähnliche Eigenschaften zu erzielen. Auch Keramikeinsätze wurden getestet. Bei den einfach herstellbaren Einsatzstoffen trat der günstige Ablöseeffekt nicht auf. Wurde ein guter Ablöseeffekt erreicht, so scheiterte das Vorhaben an der schwierigen Herstellung und der komplizierten, teuren Einbringung des neuen Formenwerkstoffes.
Preßversuche mit porösem Sintermetall brachten kein nutzbares Ergebnis, weil der Formling an der Form klebte. Selbst das Verpressen unter einem Luftpolster ergab kein brauchbares Resultat.

Metallformen

Die Metallformen erhalten zur Vermeidung von Lufteinschlüssen Entlüftungslöcher mit 2 bis 3 mm Durchmesser. Damit diese Entlüftungslöcher funktionsfähig bleiben, erweitert man die abführende Bohrung auf 10 mm. Die Wand der 10-mm-Bohrung wird mit einem Teflonschlauch ausgekleidet, der ein Verkleben der Masse in der Bohrung verringert.

Metallformen mit Elektroschockablösung

In den letzten Jahren haben sich als weiteres Preßformensystem Chromnickel-Stahlgußformen mit Elektroschockablösung einen Namen gemacht. Solche Formen arbeiten bei allen Materialfeuchten, wenn das Rohmaterial grundsätzlich für diese Verpressung geeignet ist. Die Formen bestehen aus einer besonderen Legi rung, die der Gleichstromkorrosion standhält. Sie erlauben ein bequemes Arbeiten, denn es gibt praktisch keinen Stillstand der Maschinen. Der Elektroschock bewirkt, daß Wasser elektroosmotisch zur Katode (Formenwand) wandert (s. Abschnitt 3.1.4.2.) und dort elektrolytisch zersetzt wird, so daß es zu einer Gasentwicklung kommt, welche dann die Haftung zwischen Formling und Stahlform völlig aufhebt. Die gegenüberliegende Wand (Stempel) bildet die Anode, zu der infolge der Elektrophorese die Massepartikeln wandern. Gleichzeitig wird dort der Wassergehalt verringert und somit auf andere Weise als an der Katode das Ankleben verhindert. Um den Wasserhaushalt im Preßling zu korrigieren, d. h. die Ausbildung eines hohen Feuchtegradienten zu vermeiden, und um die Ablösung zu erleichtern, wird während des Preßvorganges umgepolt.

Metallformen mit Beölung

International wird häufig mit Graugußformen gearbeitet. Den Ablöseeffekt erzielt man durch Beölung der zu verpressenden Tonkuchen oder der auf der Preßtrommel liegenden Formen. Dieses System ist dann anwendbar, wenn geeignete Trennmittel in Form von dünnen, fettarmen Ölen zur Verfügung stehen, die sich möglichst schnell verflüchtigen, damit die Trockenzeit nicht zu stark verlängert wird. Versuche, anstelle von Öl als Trennmittel pulvrige Stoffe zu verwenden, scheiterten an der Schwierigkeit der gleichmäßigen Aufbringung des Pulvers.

Formen aus Gummi

Eine Verpressung in Formen, die mit einer Gummifolie oder einer vorvulkanisierten Gummimembran überspannt sind bzw. einen vulkanisierten Gummibelag aufweisen, ist dann geeignet, wenn man sich in der Massefeuchte auf diese Verformung einstellen kann, d. h. im Durchschnitt nicht mehr als etwa 23 % Anmachwasser (bezogen auf trockene Substanz) verwenden muß und keinen Wert auf scharf profilierte Kanten legt. Die Gummifolie muß eine feine, linienartige Struktur haben, damit sich der Formling gut ablöst. Es entstehen Ziegel, die eine entsprechend fein profilierte Oberfläche aufweisen. In der Gummifolie oder Gummimembran lassen sich keine Entlüftungslöcher anbringen, aus denen Luft entweichen könnte. Ziegel mit hohen Falzen kann man daher nur schwer auf diese Weise herstellen.

Neben den eingangs in diesem Abschnitt genannten Pressentypen werden zum Nachpressen und Naßpressen auch Maschinen verwendet, die hauptsächlich bei der Formgebung unplastischer Massen Einsatz finden. Beispiele sind Kniehebelpressen, Friktionsspindelpressen und Drehtischpressen (s. Abschnitt 4.3.). Für die Herstellung von Sonderdachziegeln (Entlüftungsziegel, Firstziegel) finden u. a. Drehtischpressen Verwendung. Bei dieser Pressenart werden – wie bei den Naßpressen – Kurvensteuerungen eingesetzt. Aus dem kinematischen Schema (Bild 4.45) einer Naßpresse (Kurvenpreßautomat) ist ersichtlich, daß bei diesen Maschinen der Preßstempel (Stößel), die Füllschieber, die Greifereinrichtung, die Seitenschieber und der Ausstoßer über Kurven direkt oder über Zwischenglieder betätigt werden. Ein Beispiel für die Bewegungen dieser Maschinenteile in Abhängigkeit von der Zeit ist in Bild 4.46 dargestellt.

4.2.3.2. Kurvenpreßautomat KPA 5

Der Kurvenpreßautomat KPA 5 der Firma Dorst – Keramikmaschinenbau, Kochel am See, wird für die Herstellung von technischen Preßteilen, wie Sicherungspatronen, Schraub-

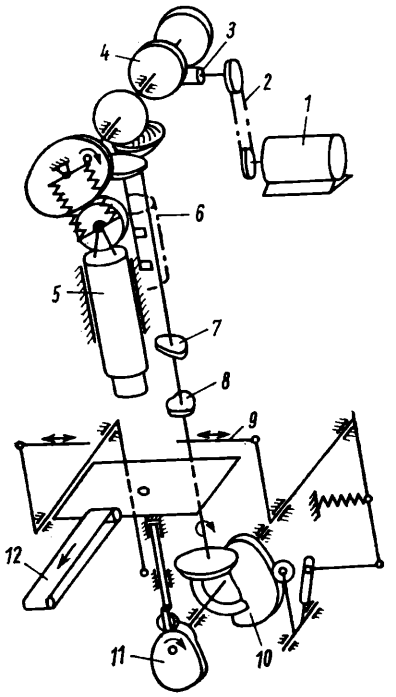


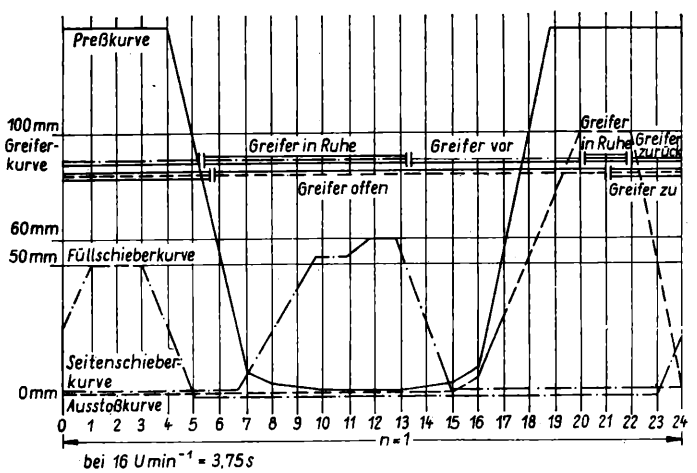
Bild 4.45. Kinematisches Schema einer Naßpresse [133]

1 Elektromotor, *2* verstellbarer Keilriemenantrieb, *3* Schneckengetriebe, *4* Rutschkupplung, *5* Stößel, *6* Silo mit Lockerungsmischer, *7* Kurve für Füllschieber, *8* Kurve für Greifereinrichtung, *9* Seitenschieber, *10* Kurve für Seitenschieber, *11* Ausstoßkurve, *12* Transportband

kappen, Schalter- und Lampensockel, Isolatoren u. a. Teilen aus ölangefeuchtetem Porzellan- oder Steatitgranulat eingesetzt [218]. Der Naßpreßautomat (Bild 4.47, s. Beilage) ist mit Kurvensteuerungen für den Oberstempelhub (*7*), die Fülleinrichtung (*3*) und den Abnehmer (*8*) ausgerüstet. Die Drehvorrichtung (*12*) zum automatischen Einpressen von Innen- und Außengewinden und die Ausstoßvorrichtung (*11*) arbeiten pneumatisch. Die maximale Preßkraft der Maschine beträgt 50 kN, die Ausstoßkraft ≈3 kN. Weitere technische Daten des KPA 5 sind in Tabelle 4.16 enthalten..

Tabelle 4.16. Technische Daten des Kurvenpreßautomaten KPA 5 [218]

Hubzahl, regelbar	10..,30 min^{-1}
Preßkraft, max.	50 kN
Ausstoßkraft	3 kN
Oberstempelhub	200 mm
Ausstoßhub	100 mm
Füllschieberhub	150 mm
Abstand Mitte Matrize bis Ständerwand	150 mm
Antriebsmotor	
Drehzahl	1500 min^{-1}
Leistung	1,5 kW
Ventilatormotor (für 2 Pressen)	
Drehzahl	2800 min^{-1}
Leistung	2,2 kW
Druckluftbedarf	21 l/Hub
Luftdruck, min.	$6 \cdot 10^5$ Pa
Nettomasse	1300 kg



für einen Preßzyklus

Bild 4.46. Darstellung der Weg/Zeit-Abhängigkeiten für Stempel, Greifer, Füllschieber, Seitenschieber und Ausstoßer bei einem Naßpreßautomaten; kurvengesteuert [238]

Die Presse besteht aus

- dem Ständer mit Antrieb und Steuerwelle,
- einem Massesilo (*5*) mit Vordosiereinrichtung,
- der Füllvorrichtung (*3*),
- der Ausstoßvorrichtung (*11*),
- dem Umsetzer und
- dem Putztisch (*10*).

Im geschweißten Pressenständer sind die Preßkurve, die Rückholkurve, die Steuerwelle und das Hebelsystem zur Druckübertragung leicht zugänglich untergebracht. Das Querhaupt ist in Prismen geführt. Der Pressenantrieb erfolgt über einen Regeltrieb und ein Schneckengetriebe durch einen 1,5-kW-Elektromotor. Die regelbare Hubzahl beträgt 10 bis 30 min^{-1}. Das Massesilo aus Leichtmetall besitzt einen Zellrad-Dosierapparat zur Vordosierung der Füllmenge. Der Antrieb des Dosierapparates, dessen Leistung stufenlos regelbar ist, erfolgt durch die Querhauptbewegung.

Das automatische Füllen der Matrizen durch die Füllvorrichtung wird durch einen zusätzlichen Rüttelhub unterstützt. Ein pneumatischer Arbeitszylinder betätigt die Ausstoßvorrichtung.

Der Umsetzer (Abnahmevorrichtung (*8*) auf Bild 4.47, s. Beilage) zum Übertragen der Preßteile auf die Aufnahmen des automatischen Putztisches (*10*) ist mit einem Drehschieber zur Steuerung des Vakuums sowie mit einer pneumatisch gesteuerten Vorrichtung zur Erzeugung eines Vertikalhubes ausgerüstet.

Der periodisch arbeitende automatische Putztisch besitzt 12 Aufnahmen mit einem Spindelabstand von 80 mm. Die Putzeinrichtung eignet sich nur für rotationssymmetrische Teile. Das Entfernen der Preßgrate erfolgt durch Putzmesser mit Hartmetallbelägen. Die taktweise Tischbewegung wird durch einen Kettentrieb mit Klinkenrad realisiert.

Tabelle 4.17 gibt einen Überblick über verschiedene Typen des KPA 5 mit deren Leistung und den gefertigten Artikeln.

Tabelle 4.17. Übersicht über verschiedene Typen des KPA 5 [218]

Typ	Anzahl der Matrizen	Artikel	Stückzahl in min^{-1}
KPA 5 Si	2	Sicherungspatronen	
		DZ 2 — 25 A	40...46
		DZ 30 — 63 A	30...40
		NDZ 2 — 25 A	36...40
KPA 5 Schr	2	Schraubkappen K II und K III	26...30
		Abdeckringe E 27 und E 33	26...30
		Fingerschutzringe	30...40
		Gewinderinge	26...30
		Weidezaunisolatoren	36...40
KPA 5 So	1	Einbau-Sicherungssockel EZ 60 A	18...20
	1	Sicherungssockel UZ 25 A	20...24
	2	Abzweigdosen	40...50
	2	Gerätestecker	38...48
	4	Paßschrauben	60...80

4.3. Maschinen und Anlagen zur Formgebung unplastischer keramischer Massen

Für das Trockenpressen unplastischer keramischer Massen werden Kniehebelpressen, Exzenterpressen, Spindelpressen, hydraulische und Drehtischpressen eingesetzt.

4.3.1. Kniehebelpressen

Kniehebelpressen dienen der Herstellung von Feuerfesterzeugnissen, Fliesen und Platten sowie zum Brikettieren, s. Abschnitt 3.2.5.3., von Steatitmassen. Das kinematische Schema einer Kniehebelpresse mit hydraulischem Gegendruck zeigt Bild 4.48. Die Presse, die zur Herstellung von Fliesen zum Einsatz kommt, arbeitet mit Vor- und Nachpreßdruck. Bild 4.49 zeigt die Arbeitstakte eines Preßzyklus.

4.3.2. Spindelpressen

Spindelpressen werden u. a. zur Herstellung von Steinen und Platten eingesetzt. Bei diesen Pres-

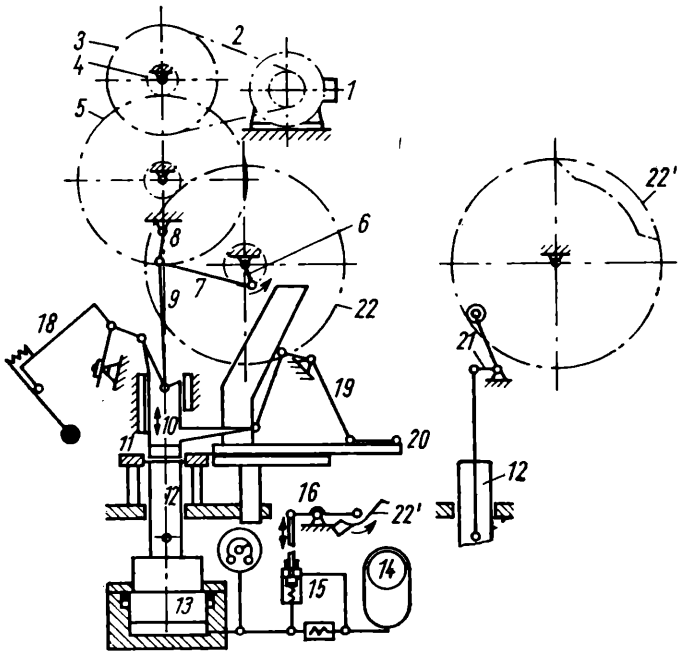


Bild 4.48. Kinematisches Schema der Kniehebelpresse B 125 mit obenliegendem Antrieb [215]

1 Elektromotor, *2* Keilriemenantrieb, *3* Schwungscheibe, *4* Elektromagnet-Einflächenkupplung, *5* Stirnradvorgelege, *6* Kurbelwelle, *7* Koppel, *8* Schwinge, *9* Stößel, *10* Querhaupt, *11* Werkzeugoberteil, *12* Werkzeugunterteil, *13* hydraulischer Topf, *14* Druckspeicher, *15* gesteuertes Absperrventil, *16* Gestänge für die Steuerung des Ventils *15*, *17* Überdruckventil, *18* Oberstempelputzvorrichtung, *19* Füllschieberantrieb, *20* Füllschieber, *21* Ausstoßhebel, *22* Zahnrad mit Steuerkurven, *22'* für Absperrventil und Ausstoßhebel (der Übersicht halber wurden die Elemente *22'* nach unten bzw. rechts herausgezeichnet)

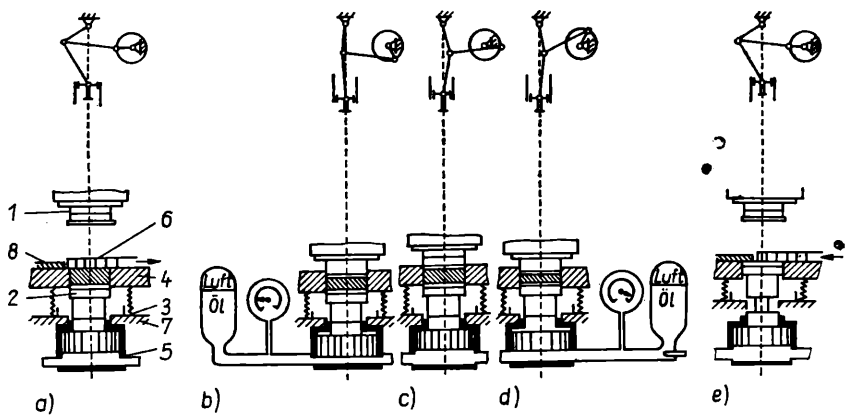


Bild 4.49. Arbeitstakte eines Preßzyklus der B 125 [215]

a) Oberstempel hochgefahren; Form mit Preßmasse gefüllt
b) Oberstempel zum Vordruck aufgefahren; Unterstempel gegen Öldruck durchgefedert
c) Oberstempel zur Entlüftung angehoben; Unterstempel zurückgefedert
d) Oberstempel zum Hauptdruck aufgefahren; Gegendruck von unten mit höchstem Wert
e) Oberstempel und Unterstempel hochgefahren; Formling ausgestoßen

1 Oberstempel, *2* Unterstempel, *3* Matrizenunterrahmen, *4* Matrizenoberrahmen, auf Federn sitzend, *5* Zylinder für hydraulischen Gegendruck, *6* Füllschieber, *7* Pressentisch, *8* Formling

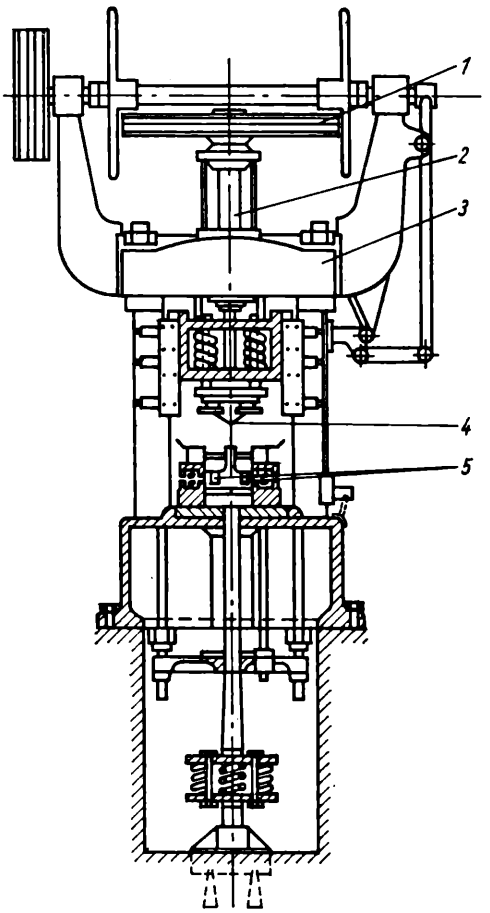


Bild 4.50. Schema einer Friktionsspindelpresse [153]
1 Friktionsscheibe, *2* Spindel, *3* Querhaupt, *4* Oberstempel, *5* Unterstempel

sen bewegt sich der Oberstempel mit Hilfe einer rotierenden Spindel. Das Prinzip der Presse (Bild 4.50) besteht darin, daß zwei auf einer in der Horizontalen verschiebbaren Antriebswelle sitzende Scheiben abwechselnd ihre Bewegung auf eine waagerecht angeordnete Friktionsscheibe übertragen. In Abhängigkeit davon, welche der beiden Scheiben mit der Friktionsscheibe in Kontakt (Reibung) steht, dreht sich die Friktionsscheibe links- oder rechtsherum. Durch die an der Friktionsscheibe befestigte Gewindespindel, die in einer im Querhaupt angeordneten Mutter läuft, wird die Auf- und Abwärtsbewegung des Oberstempels bewirkt. Das Verpressen erfolgt durch Absenken des Oberstempels in die mit Masse gefüllte Form. Nach dem Pressen wird der Oberstempel nach oben gefahren, und der Unterstempel drückt den Formling zur Abnahme bis auf Tischhöhe.

4.3.3. Exzenterpressen mit Matrizenabzug

4.3.3.1. Wirkungsweise

Zur Herstellung der verschiedenartigsten Teile in der technischen Keramik, wie U-Kerne, Kupplungsklauen, Bundbuchsen, Scheiben und dergleichen, werden Exzenterpressen mit Matrizenabzug eingesetzt. Die grundsätzliche Funktionsweise dieser Trockenpreßautomaten ist in Bild 4.51 dargestellt. Es handelt sich hierbei um ein zwangsläufiges Matrizenabzugverfahren, wobei die Bewegung des Oberstempels durch Exzenter mit Pleuel erzeugt und die Matrize über Kurven *zwangsläufig* nach unten mitgenommen wird. Nach dem Eintauchen des Oberstempels in die Matrize werden Oberstempel und Matrize im Gleichlauf abgesenkt, s. Bilder 4.51b und c.
Da das Erzeugnis nicht durch Anheben des Unterstempels aus der Form ausgestoßen werden kann, gleitet nach beendeter Verdichtung die Matrize noch so lange nach unten, bis die Preßlingsunterkante das gleiche Niveau wie die Matrizenoberkante aufweist, s. Bild 4.51d. Dieser Vorgang führt zur Gesamtbezeichnung *Matrizenabzugpreßverfahren*, s. auch Abschnitt 3.3.3.5. Im Ergebnis erhält man durch diese zwangsgesteuerte Matrizenbewegung eine bessere Randzonenverdichtung als z. B. bei Einseitenpressung mit feststehender Matrize (s. Abschnitt 3.3.3.2.).
Bei den bisher beschriebenen Bewegungen sind folgende Größen von Interesse:

$$h_F = f\,h \tag{4.1}$$

$$s = h_F - (s_{M1} + e_0) \tag{4.2}$$

$$s_{M2} = h + s_0 \tag{4.3}$$

h_F Füllhöhe
h Artikelhöhe
f Füllfaktor (2 bis 2,5)
s Preßweg
s_{M1} Matrizenweg bis zum Ende der Pressung
s_{M2} gesamter Matrizenweg (Weg der Matrize während der Pressung und Entformung)
s_0 Oberstempeleintritt in die Matrize
e_0 Oberstempelweg im Kontakt mit der Masse.

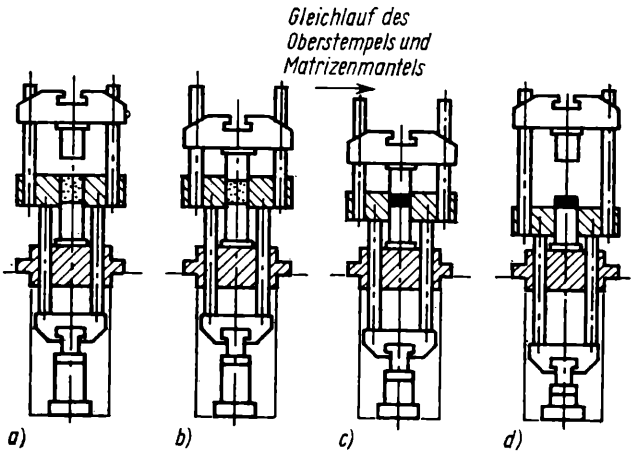


Bild 4.51. Schematische Darstellung des Matrizenabzugpreßverfahrens
a) Füllstellung
b) Oberstempeleintritt
c) Preßstellung
d) Abzugstellung

Im komplexen Zusammenwirken und unter Berücksichtigung weiterer Details sind die möglichen Bewegungsverhältnisse an einem ausgewählten Beispiel aus Bild 4.52 zu entnehmen. Neben der Bewegung des Oberstempels und des Matrizenmantels sind aus Bild 4.52 ebenfalls die zeitlichen Abhängigkeiten für Füllschuh und Niederhalter ersichtlich. Der Niederhalter tritt dann in Funktion, wenn mit geteiltem Oberwerkzeug gearbeitet werden muß und das Abheben des Oberstempels nicht mit dem Abheben des gesamten Werkzeuges identisch ist. Die für den Antrieb von Füllschuh und Niederhalter eingesetzten Kurven ermöglichen über eine mechanische Verstellung eine zeitliche Verschiebung der Einsatzpunkte. Die Bewegung des Oberstempels wird dadurch nicht beeinflußt.
Das Arbeitsprinzip eines Trockenpreßautomaten, der die in Bild 4.52 gezeigten Bewegungsabläufe zuläßt, ist unter Einbeziehung der bereits zu Bild 4.51 erläuterten Schritte in Bild 4.53 dargestellt. Folgende Angaben sind von Interesse:

Preßweg

Der Preßweg für die Unterpressung ist der Weg der Matrize von der Füll- (Bild 4.53a) in die Preßstellung (Bild 4.53f).

Abzugweg

Der Abzugweg ist der Weg der Matrize von der Preß- (Bild 4.53g) in die Abzugstellung (Bild 4.53h). Diese Bewegung wird durch Kurven erzeugt. Der Abzugweg ist stufenlos einstellbar. Nach erfolgtem Abzug wird die Matrize durch den Kolben eines pneumatischen Arbeitszylinders wieder in Füllstellung gedrückt. Die Kolbenkraft ist von dem am Druckminderer eingestellten Druck abhängig. Der Matrizenweg wird nach oben hin durch einen stufenlos verstellbaren Anschlag begrenzt.

Oberpressung

Durch den Gleichlauf des Oberstempels mit dem Matrizenmantel erfolgt die Pressung im wesentlichen von unten (Unterpressung). Die Trockenpreßautomaten gestatten es aber in der Regel, den Matrizenmantel früher in Preßstellung zu bringen (s. Bild 4.53f), als der Oberstempel seine unterste Preßstellung erreicht. Der Matrizenmantel bleibt dann in Preßstellung stehen, während der Oberstempel sie erst kurze Zeit später erreicht (Bild 4.53g). Durch diese Maßnahme erfolgt eine nachträgliche Verdichtung von oben. Mit der stufenlosen Einstellung der Oberpressung kann die Lage der neutralen Zone des Preßlings (s. Abschnitt 3.3.3.5.) verändert werden, und derselbe erhält eine gleichmäßigere Dichte. Für ein gegebenes Erzeugnis soll dazu ein Beispiel genannt werden:

- Füllhöhe = 20 mm
- Preßlingshöhe = 10 mm
- Oberstempeleintritt = 4 mm
- Preßweg = 6 mm.

Die Verdichtung des Preßlings nimmt ohne Oberpressung von unten nach oben ab. Wenn

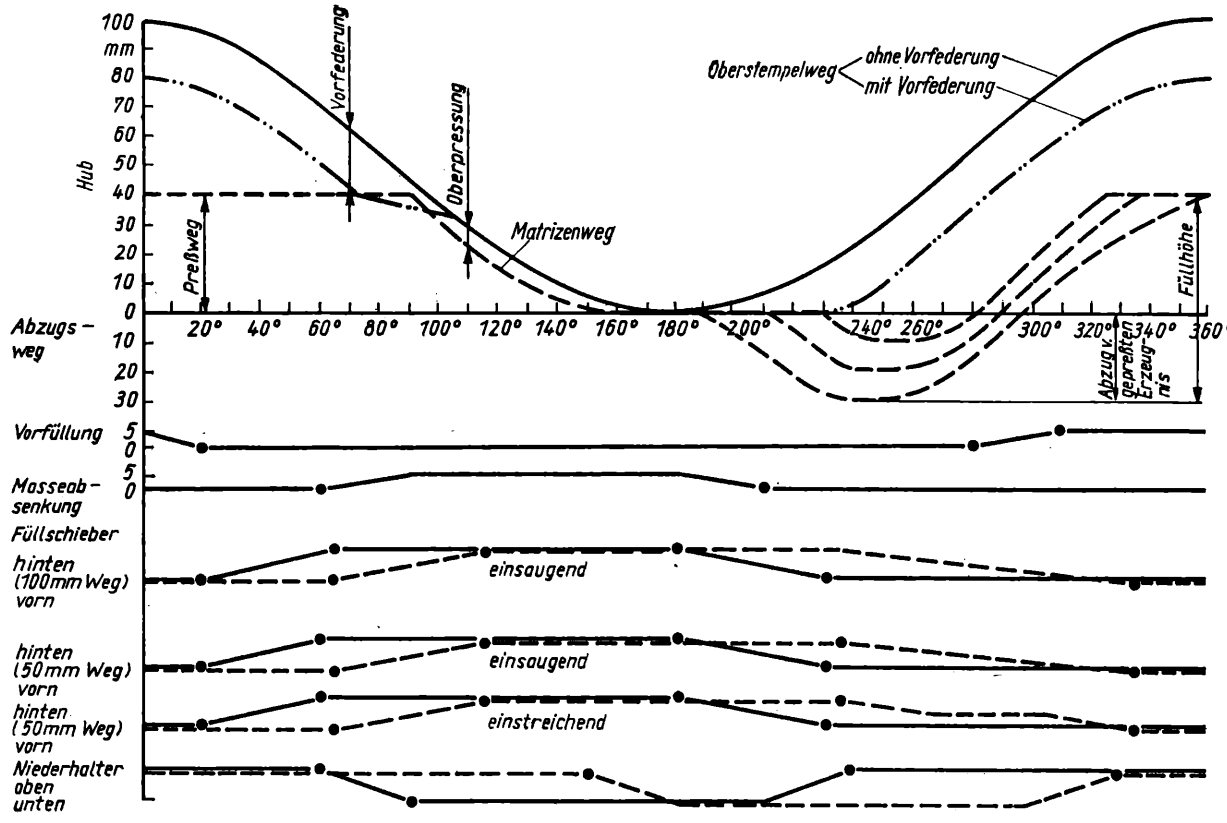


Bild 4.52. Kurvendiagramm für ein Einsatzbeispiel einer Hochleistungsexzenterpresse mit Matrizenabzug

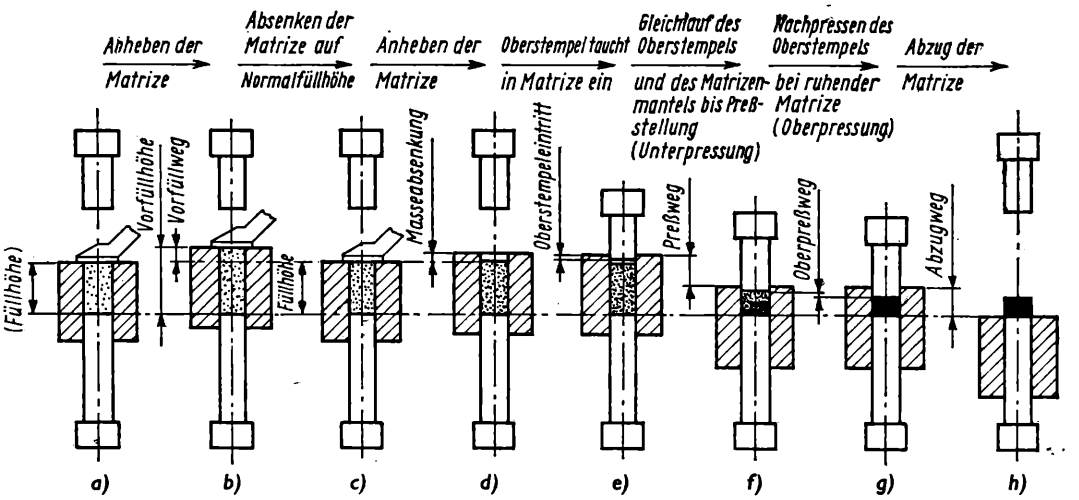


Bild 4.53. Arbeitsprinzip einer Hochleistungsexzenterpresse mit Matrizenabzug

a) Füllstellung — *c*) Füllstellung — *e*) Oberstempeleintritt — *g*) Preßstellung
b) Vorfüllstellung — *d*) Massespiegel abgesenkt — *f*) Ende der Unterpressung — *h*) Abzugstellung

Füllhöhe = Füllfaktor × Artikelhöhe
Preßweg = Füllhöhe + Masseabsenkung — Abzugweg; Abzugweg = Oberstempeleintritt + Artikelhöhe + Oberpressung

jetzt für das zitierte Beispiel eine Oberpressung von 2 mm eingestellt wird, verläuft der Preßvorgang wie folgt: Der Oberstempel tritt zunächst nur 2 mm tief in die Matrize ein. Es schließt sich der Gleichlauf von Oberstempel und Matrize bei gleichzeitiger Unterpressung an, wobei die Matrize die Preßstellung zuerst erreicht. Der Oberstempel bewegt sich anschließend die eingestellten 2 mm weiter nach unten und führt die Oberpressung aus. 2 mm plus 2 mm ergeben den möglichen Gesamteintritt von 4 mm des Oberstempels in die Matrize. Durch die Oberpressung wird eine Nachverdichtung der oberen Kanten bei großem Verhältnis von $h:d$ angestrebt.

Vorfüllung

Die Vorfüllung (s. Bild 4.53b), die nicht bei allen Typen der Hochleistungsexzenterpressen mit Matrizenabzug vorhanden ist, bewirkt eine kurzzeitige Vergrößerung des Füllraumes, wobei der Füllschuh über der Matrizenöffnung steht. Anschließend kehrt die Matrize in die Normalfüllhöhe (s. Bild 4.53c) zurück. Durch diesen Vorgang werden Brücken in der Preßmasse abgebaut und eine gleichmäßigere Fülldichte erreicht. Die Überhöhung des Füllraumes entsteht durch kurvengesteuertes Anheben des Anschlages für die Füllhöhe. Der Betrag für die Überhöhung kann in der Regel stufenlos eingestellt werden.

Masseabsenkung

Die ebenfalls nicht bei allen Ausführungsarten der Presse mögliche Masseabsenkung stellt ein kurzzeitiges Anheben der Matrize und damit ein relatives Absenken des Massespiegels im Füllraum dar (s. Bild 4.53d), um beim Eintritt des Oberstempels in die Matrize ein Wegspritzen von Masse zu verhindern. Damit werden Masse- und Dickenunterschiede bei dünnen Scheiben weitestgehend vermieden. Dieses Anheben der Matrize erfolgt analog der Vorfüllung und kann meist ebenfalls stufenlos eingestellt werden.

Vorfederung

Bei schlecht entlüfteten Massen oder zu besonderen Steuerzwecken kann der Oberstempel eine Vorfederung erhalten. Das Maß der Vorfederung ist bis 20 mm stufenlos einstellbar. Es kann beim Pressen am Oberstempel abgelesen werden. Die Vorfederung erreicht man dadurch, daß der Oberstempel durch eine Druckfeder nach unten gedrückt wird. In Preßstellung ist die Vorfederung überbrückt.

Trotz aller teilweise sehr diffiziler maschinentechnischen Maßnahmen treten jedoch immer

wieder nicht akzeptable Verdichtungsinhomogenitäten auf. *Riedel* [203] beschreibt einige Möglichkeiten, ihnen für Al_2O_3-Gehäuseschalen zu begegnen:

- An die Gehäusegeometrie angepaßte optimale Füllerkonstruktion (einschließlich Einbau von Leitblechen) sowie Abschrägen des Ober- und Unterstempels (d. h. unterschiedliche Füllhöhen in der Matrize, um Granulatentmischungen beim Füllvorgang auszugleichen).
- Begrenzung der Arbeitsgeschwindigkeiten auf einen Wert, der einerseits der Produktivität und andererseits der Verdichtungshomogenität gerecht wird.
- Einsatz geteilter Werkzeuge, um durch unterschiedliche Einfüllhöhen während des Preßvorganges eine gleichmäßigere Verdichtung zu erreichen. Al_2O_3-Gehäuseschalen mit Versenk, die auf Exzenterpressen mit Matrizenabzug gefertigt werden, liegen während des Preßvorganges mit Versenk nach unten auf einem geteilten Unterstempel. Während des Matrizenfüllvorganges befindet sich der steuerbare Mittelkern des Unterstempels in erhöhter Position, woraus an dieser Stelle eine geringere Füllhöhe resultiert, die dann zu einer gleichmäßigeren Verdichtung führt. Eine richtig eingestellte Höhe des Mittelkerns des Unterstempels zwischen 60 bis 70 % der Füllhöhe für das gegebene Erzeugnis bewirkt eine exakte Geometrie (Außenkontur) bei optimaler Ebenheit der Oberfläche.
- Optimale Einstellung der Eigenschaften des Sprühgranulats; für Al_2O_3-Gehäuseschalen sollten der Feinkornanteil $<30\ \mu m$ nicht mehr als 5 % betragen und zu starke Abweichungen von der Kugelform vermieden werden. Die günstigste Schüttdichte des Granulats liegt bei 1,0 bis 1,2 g cm^{-3} und die Restfeuchte unter 0,4 %. Eine zu hohe Trockentemperatur bei der Sprühgranulierung verursacht durch das verstärkte Aushärten des organischen Binders eine Verhärtung der Granalien, was Inhomogenitäten des gesinterten Körpers bewirkt.

4.3.3.2. Hochleistungsexzenterpressen mit Matrizenabzug vom Typ TPA

Die Hochleistungsexzenterpreßautomaten TPA der Firma Dorst – Maschinen- und Anlagenbau, Kochel am See, arbeiten nach dem Matrizenabzugverfahren (s. Abschnitt 4.3.3.1.) mit rein mechanisch gesteuerten Hauptbewegungen [218]. Eine optimale Dichteverteilung im Preßteil wird durch die hydraulisch verriegelte Oberpressung garantiert.

Die mechanische Arbeitsweise ermöglicht hohe Hubzahlen bei höchster Präzision der Preßlinge hinsichtlich Masse- und Maßhaltigkeit sowie eine optimale Reproduzierbarkeit einmal eingestellter Werte. Durch die Ausstattung der Pressen mit einer elektronisch-digitalen Preßkraftanzeige ist die Möglichkeit gegeben, minimale und maximale Preßdruckwerte vorzugeben und so einen hohen Schutz von Maschine und Werkzeugen zu erreichen. Der Antrieb der Automaten erfolgt durch einen Elektromotor, dessen Drehbewegung über einen Spreizscheibentrieb, eine pneumatisch betätigte Bremskupplung und ein Schneckengetriebe auf ein Exzenterradpaar übertragen wird. Durch das Exzenterradpaar erfolgt über Pleuel und Zugstangen die Steuerung der Hauptbewegungen der Obertraverse. Durch Kurvensteuerungen, die zur Erzeugung weiterer Bewegungsabläufe dienen, werden z. B. die Matrize und der Füllschuh betätigt. Die großdimensionierte Bremskupplung garantiert bei geringem Verschleiß einen minimalen Nachlauf der Presse.

Der Oberstempel der Presse ist in der Obertraverse gelagert. Er kann in der Höhe verstellt werden. Der Verstellweg ist an einem Anzeigegerät ablesbar und durch Endschalter begrenzt.

Die vom Oberstempel aufgebrachte Preßkraft wird durch das im Stempel befindliche »Ölpolster« übertragen. Den Vordruck des Öls kann man einstellen. Die Druckanzeige ist mit einer Überlastsicherung kombiniert.

Die technischen Daten einiger Trockenpreßautomaten TPA enthält Tabelle 4.18. Den Hochleistungspreßautomaten TPA 6 zeigt Bild 4.54.

Für Trockenpreßautomaten größerer Preßkraft (bis 8000 kN) wurden – abweichend von kurvengesteuerten Exzenterpressen – Pressen mit elektronisch/hydraulischer Steuerung entwickelt. Die in diesen Pressen einsetzbaren Werkzeuge mit bis zu 6 elektronisch gesteuerten und geregelten Werkzeugebenen ermöglichen auch die Herstellung von komplizierten Preßteilen auf einfache Weise und mit optimaler Qualität.

Tabelle 4.18. Technische Daten verschiedener Trockenpreßautomaten mit Matrizenabzug, Typ TPA [218]

	TPA 5	TPA 6	TPA 15/3	TPA 20/3	TPA 50/2
Hubzahl, min^{-1}	9,5...46	9,5...63	18...50	5...30	6...30
Preßkraft, max., kN	50	60	150	200	500
Abzugskraft, max., kN	40	40	80	100	300
Gegenhaltekraft in Preßstellung, kN	30	30	50	50	250
Oberstempelhub, mm	95	95	100	175	200
Füllhöhe, max., mm	60	70	65	140	185
Abzugsweg, max., mm	30	35	35	70	90
Weg der Oberpressung, max., mm	6	6	6	15	18
Antriebsmotor, kW	1,4/2,2	3	3	5,5	11

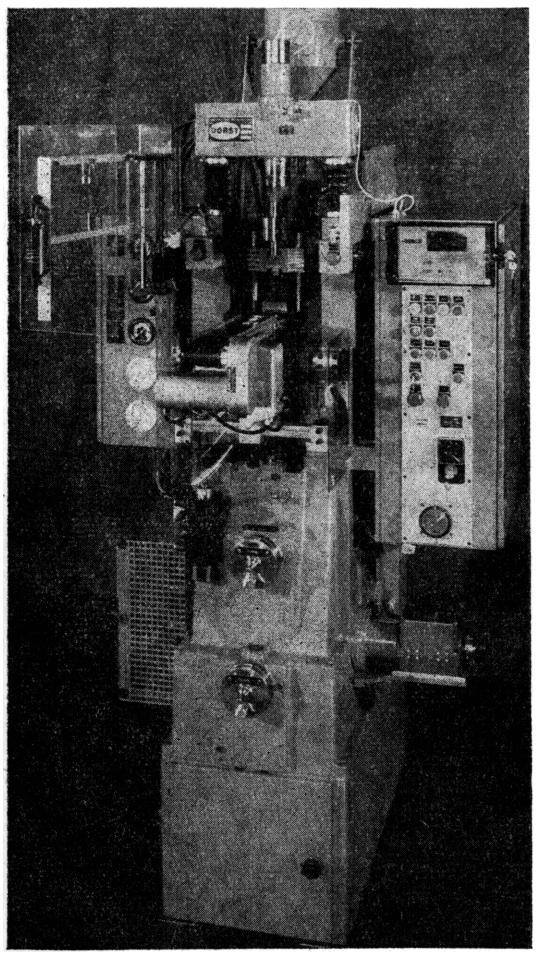


Bild 4.54. Hochleistungspreßautomat TPA 6 mit Matrizenabzug [218]

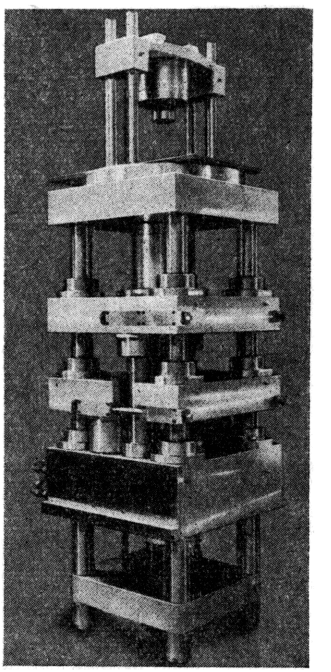


Bild 4.55. Werkzeug für hydraulische Preßautomaten TPA-H [218]

Bild 4.55 zeigt ein solches Werkzeug für den hydraulischen Trockenpreßautomaten TPA-H der Firma Dorst – Maschinen- und Anlagenbau, Kochel am See, [218]. Der schematische Aufbau und die Anordnung in Preß- und Füllstellung gehen aus Bild 4.56 hervor.

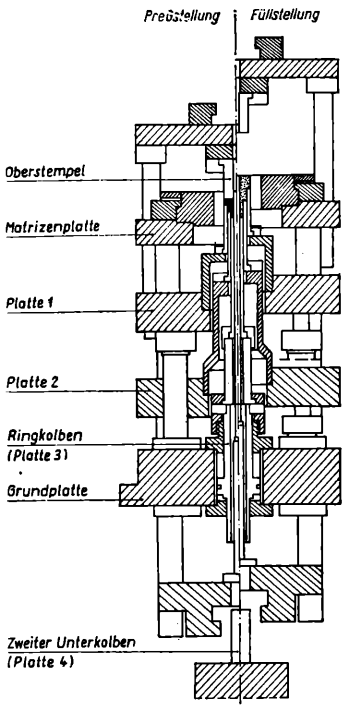


Bild 4.56. Schematische Darstellung der sechs Werkzeugebenen des TPA-H in Preß- und Füllstellung [218]

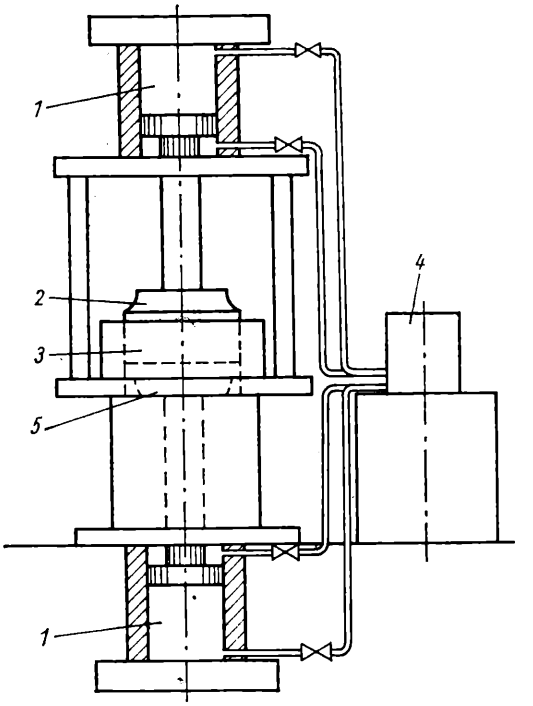


Bild 4.57. Prinzip einer hydraulischen Presse [153]
1 Druckzylinder, *2* oberer Stempel, *3* Formkasten, *4* Öldruckpumpe, *5* unterer Stempel

4.3.4. Hydraulische Pressen

4.3.4.1. Wirkungsweise

Hydraulische Pressen werden in fast allen Bereichen der Keramik eingesetzt und haben sich in den letzten Jahren z. T. gegenüber den anderen Pressentypen durchgesetzt. Das Prinzip einer hydraulischen Presse zeigt Bild 4.57, ein Ausführungsbeispiel Bild 4.58. Bei Bild 4.58 handelt es sich um die PHD 800, eine hydraulische 4-Säulen-Presse mit 8 MN Preßkraft der Firma SACMI, Imola [239]. Derartige Pressen werden in der Feuerfest- und Baukeramikindustrie eingesetzt.

Die meisten hydraulisch arbeitenden Pressen sind so konstruiert, daß der Druck doppelseitig ausgeübt wird. Die Formen sind auswechselbar in einen Preßtisch eingelassen. Zum Füllen der Form und zum Abnehmen der gepreßten Formlinge besitzen die Pressen automatische Vorrichtungen. Das Auswerfen der Formlinge erfolgt durch den Unterstempel, sobald der Oberstempel nach oben gefahren ist.

Pressen mit einseitigem hydraulischem Druck sind zur Herstellung von flachen Artikeln, wie Fliesen und Platten, geeignet. Es sind sowohl Pressen bekannt, bei denen der Hauptpreßdruck durch den Oberstempel, als auch Pressen, bei denen der Hauptpreßdruck durch den Unterstempel aufgebracht wird. Bild 4.59 zeigt den Preßvorgang bei einer Fliesenpresse mit Vorverdichtung von oben und Vor- sowie Fertigpressen von unten, Bild 4.60 die dazugehörige Preßkurve und Bild 4.61 das Kraft/Zeit-Diagramm.

Die Preßstempel sind i. allg. aus Stahl und werden elektrisch beheizt. Aus Sicherheitsgründen beträgt die Heizspannung 42 V. Es sind jedoch auch gummierte Stempel bei entsprechend geeigneten Massen einsetzbar. Bei diesen kann auf die Beheizung verzichtet werden.

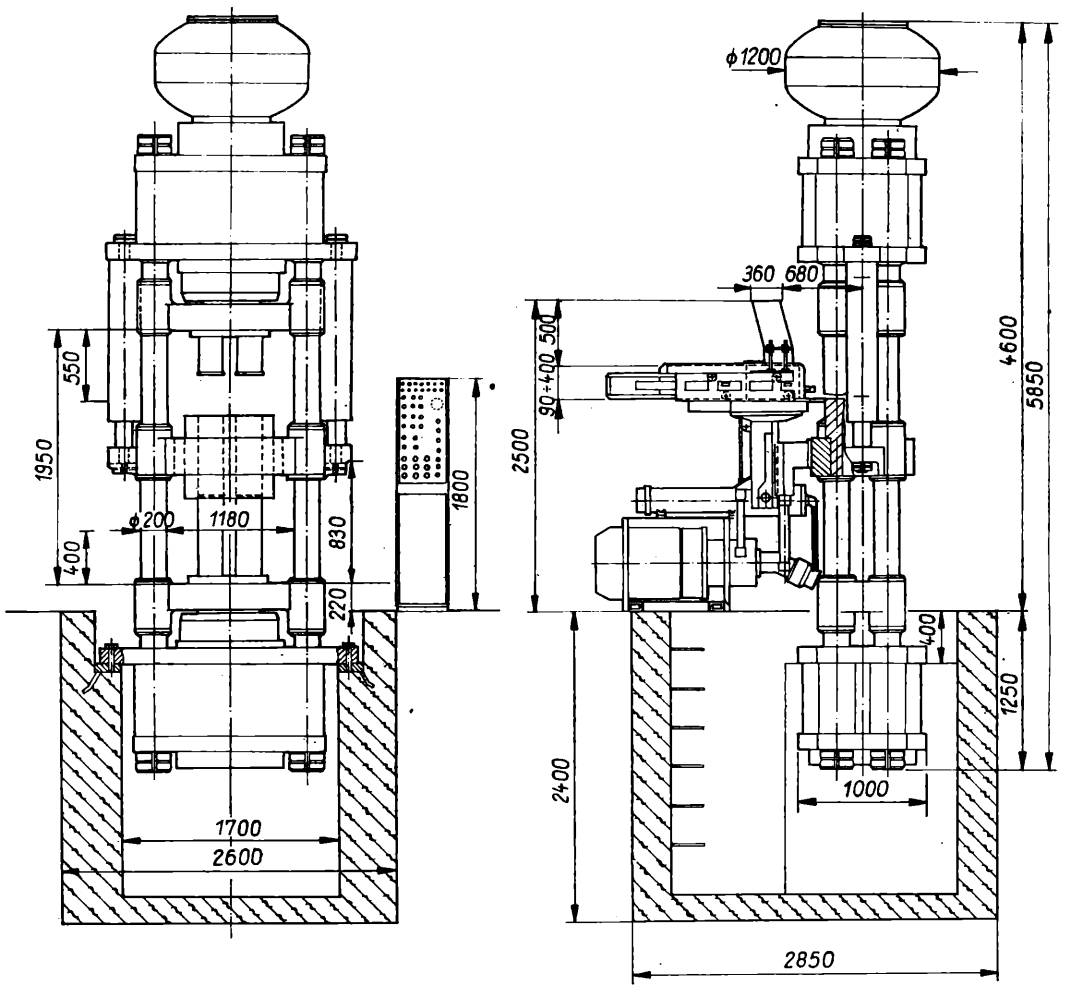


Bild 4.58. Hydraulische 4-Säulen-Presse PHD 800 mit 8 MN Preßkraft [239]

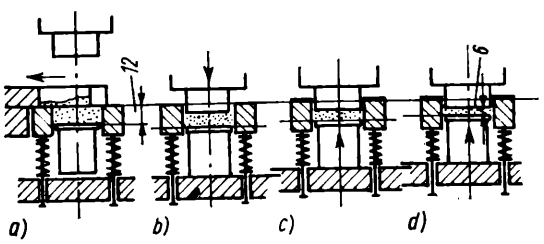


Bild 4.59. Preßvorgang (sche matisch) bei einer hydraulischen Fliesenpresse

a) Füllen der Form
b) Vorverdichten
c) Vorpressen
d) Fertigpressen

Die in die Preßform eingefüllte Masse wird je nach ihrer Eigenschaft und dem aufgewendeten Druck verdichtet. In der Regel beträgt der Verformungsgrad annähernd 50 %. Die Versuche zeigen, daß bis zu einem Verformungsgrad von 40 % kein nennenswerter Kraftanstieg eintritt (Punkt *B* auf Bild 4.60). Im wesentlichen wird während dieser Verformungsphase lediglich die Luft zwischen den Massekörnern verdrängt, so daß die Hohlräume in der Füllung weitgehend

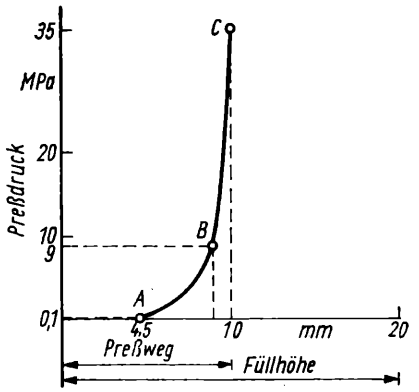


Bild 4.60. Preßkurve einer Fliesenpresse, die entsprechend Bild 4.59 arbeitet

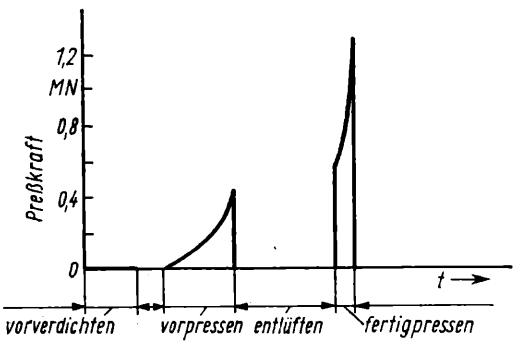


Bild 4.61. Kraft/Zeit-Diagramm für einen Preßvorgang entsprechend den Bildern 4.59 und 4.60

beseitigt sind. Die restlichen 10 % Verformung rufen einen steilen Anstieg der Preßkraft (Punkt *C* auf Bild 4.60) hervor, der etwa der Funktion (4.4) entspricht:

$$y = a\,x^c. \tag{4.4}$$

Das steht voll mit der Feststellung in Abschnitt 3.3.2.1. in Übereinstimmung.

Setzt man für y den Preßdruck p und für x den Preßweg s (also nicht die Fliesenhöhe, wie in den Gln. (3.12) bis (3.19)), ein, so ist der konstante Wert a von der Füllhöhe der Preßform und dem maximalen Preßdruck abhängig, während der Exponent c (in Gl. (3.12) mit n bezeichnet) vom Verdichtungsverhalten der Preßmasse beeinflußt wird. Bei einer Füllhöhe von 20 mm, was einer Fliesendicke von 10 mm entspricht, s. Bild 4.60, und bei einem maximalen Preßdruck von 34,7 MPa erhält man folgenden konkreten Verlauf von Gl. (4.4) [215]:

$$p = 9\left(\frac{s}{9}\right)^{13} \tag{4.5}$$

(p in MPa, s in mm).

Der Exponent $c = 13$ hängt von der Qualität der Masse ab. In Tabelle 3.4 sind für andere Fliesenmassen unter Verwendung anderer Pressentypen auch niedrigere Werte festgestellt worden.

Auf Bild 4.59 sind die verschiedenen Stadien des Fliesenpressens dargestellt. Das *Vorverdichten* durch den Oberstempel bewirkt bereits eine Verdichtung auf 40 bis 45 % der Gesamtverdichtung (Punkt *A* auf Bild 4.60). Die dafür benötigten Kräfte sind verschwindend gering (etwa 10 kN). Das *Vorpressen* durch den Unterstempel wird mit etwa 1/4 bis 1/3 der Fertigpreßkraft ausgeführt, wobei weitere ≈40 % der Gesamtverdichtung erreicht werden (Punkt *B* auf Bild 4.60). Das *Fertigpressen* durch den Unterstempel erfolgt anschließend an das Entlüften, s. auch Bild 4.61, mit voller Preßkraft und führt zur Endverdichtung (Punkt *C* auf Bild 4.60). Durch Umschalten kann man den Entlüftungshub, falls er sich bei bestimmten Massen und Erzeugnissen als nicht notwendig erweist, ganz beseitigen.

Nach Beendigung des Preßvorganges wird die fertiggepreßte Fliese aus der Form ausgestoßen. Die Ausstoßkraft ist beim Beginn des Ausstoßes am größten. Sie wird von den Eigenschaften der Masse und der Ausbildung des Werkzeuges beeinflußt (Formschrägo der Preßwerkzeuge).

Die mögliche Hubzahl ist von der Fliesendicke

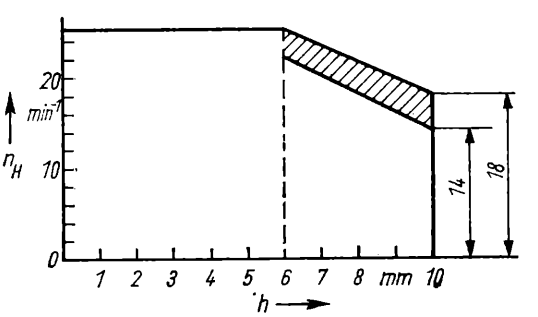


Bild 4.62. Erreichbare Hubzahl n_H in Abhängigkeit von der Fliesenhöhe h

bei Ausnutzung der konstanten Leistung des Antriebs abhängig. Den prinzipiellen Zusammenhang verdeutlicht Bild 4.62 an einem Beispiel. Die obere Kurve gibt die maximal mögliche Hubzahl, abhängig von der Fliesendicke, an. Der schraffierte Raum schließt das Schwankungsfeld ein, wobei das Maximum bei Verwendung von sprühgetrockneten Massen mit guten Entlüftungseigenschaften und richtiger Einstellung der Pressen erreicht werden kann.

4.3.4.2. Hydraulische Fliesenpresse PY 500

Die hydraulische Fliesenpresse PY 500 des VEB Thuringia Sonneberg, Kombinat für Glas- und Keramikmaschinenbau, erlaubt bei einer Matrizeneinbaufläche von 6230 cm² und einer maximalen Preßkraft von 5,5 MN die Fertigung von Wand- und Bodenfliesen mit Mehrfachmatrizen und von großformatigen Fliesen bis 22 mm Dicke [215]. Bild 4.63 zeigt Beispiele für mögliche Matrizenformen der PY 500 und der anderen Pressen der Typenreihe PY. Als Preßmaterial werden Massen mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 5 bis 8 % eingesetzt. Die Pressen der Typenreihe PY (Bild 4.64) bestehen aus

- einem Ständer, dessen zwei Säulen gleichzeitig die Führung der Preßtraverse (*6*) und der Oberstempeltraverse (*3*) übernehmen,

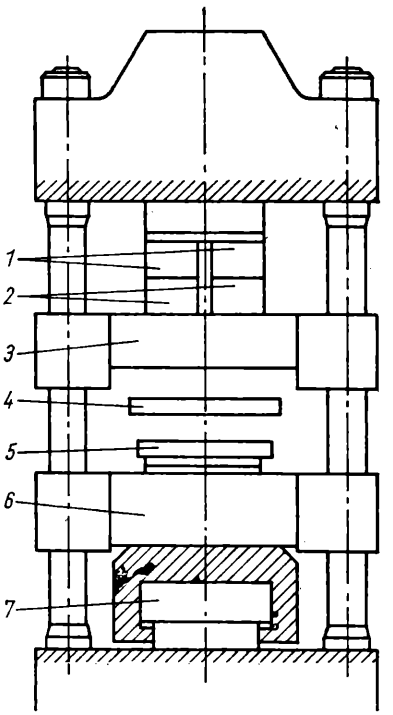


Bild 4.64. Prinzipieller Aufbau der hydraulischen Pressen der Typenreihe PY [215]

1 Sperrklötze, *2* Auflageklötze, *3* Oberstempeltraverse, *4* Matrizenrahmen, *5* Unterstempelplatte, *6* Preßtraverse, *7* Preßzylinder

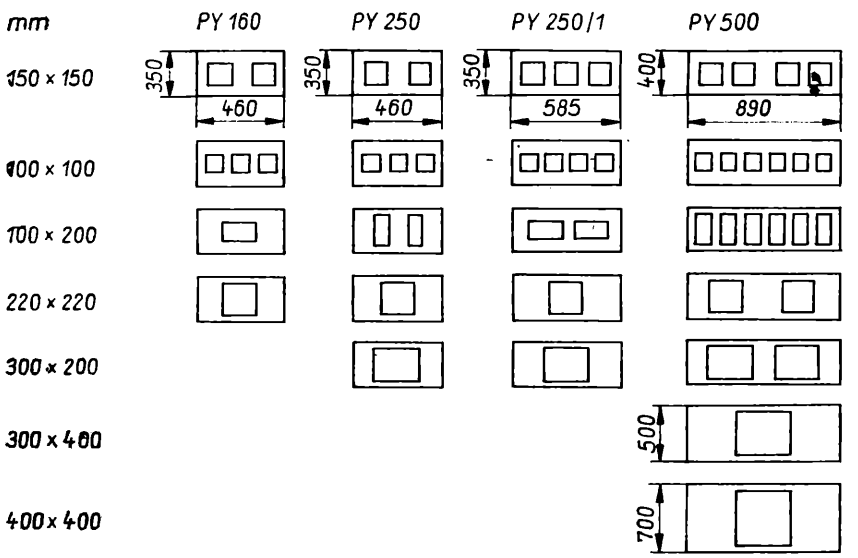


Bild 4.63. Beispiele für Matrizenformen der PY 500 und anderer Pressen der Typenreihe PY [215]

- der Preßeinrichtung,
- der Schließ- und Sperreinrichtung,
- der Ausstoßeinrichtung,
- der Fülleinrichtung und der Matrize,
- dem Hydraulikschrank sowie
- dem Elektroschrank.

Im *Hydraulikschrank* sind der zentrale Antrieb, die hydraulischen Steuerelemente, ein Ölfilter und ein Ölbehälter untergebracht. Die Kühlung des Öls erfolgt über einen Rohrbündel-Wärmeübertrager mit Kühlwasser. Das Hydrauliköl wird von einer Pumpenkombination durch Rohre und Schläuche zur Presse gefördert. Sowohl die Hochdruck- als auch die Niederdruckseite sind mit Druckspeichern versehen, so daß eine ständige Ölreserve zur Verfügung steht. Dadurch können kurzzeitig für die Funktion der Presse notwendige hohe Förderleistungen erzielt werden.

Im allgemeinen wirkt das Niederdrucksystem ständig wie eine Feder auf die Arbeitszylinder, so daß beim Abschalten des Hochdrucks der Kolben der Arbeitszylinder ausfährt (Bild 4.65). Beim Preßzylinder ist die Anordnung der Drücke umgekehrt (Bilder 4.66 und 4.67).

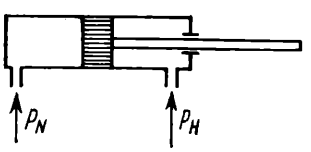


Bild 4.65. Steuerung der Arbeitszylinder mit Hoch- und Niederdruck

p_N liegt an → Kolben fährt aus; p_N + p_H liegen an → Kolben fährt ein

Alle Leitungen sind mit Ventilen versehen, so daß die Geschwindigkeit der hydraulisch gesteuerten Bewegungen geregelt werden kann. Bei der Einstellung ist darauf zu achten, daß ein ruhiger, stoßfreier Ablauf erfolgt. Der Preßzyklus wird entsprechend den einzeln optimierbaren Arbeitstakten elektronisch gesteuert und überwacht.

Die Teilschritte des *Füll-, Preß- und Ausstoßvorganges* laufen entsprechend Bild 4.68 ab:

1. Beim Einschalten des Antriebes und des Steuersystems bewegen sich die Oberstempel in die oberste Stellung.

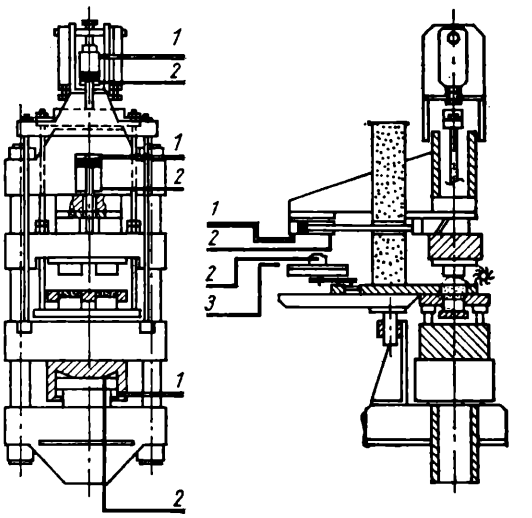


Bild 4.66. Fliesenpresse der Serie PY in Füllstellung

1 Niederdruck, *2* Hochdruck, *3* Ablauf

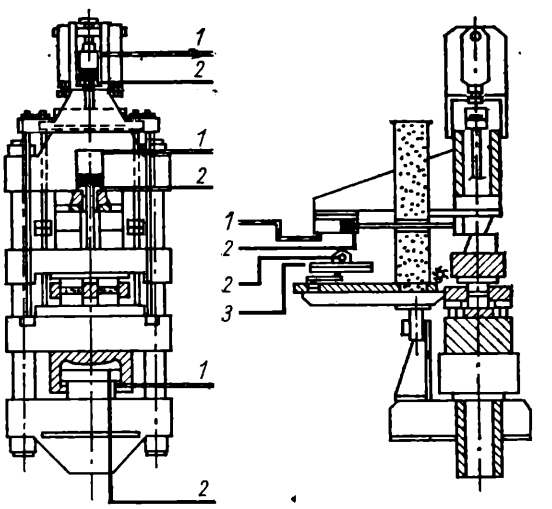
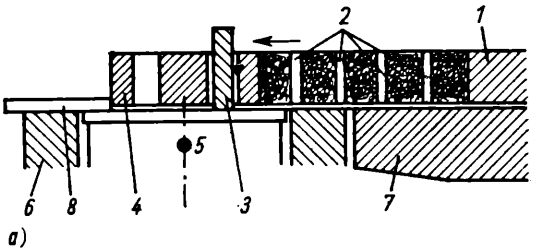


Bild 4.67. Fliesenpresse der Serie PY in Preßstellung [215]

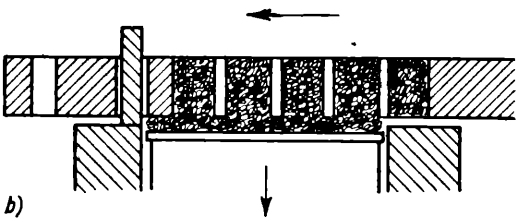
1 Niederdruck, *2* Hochdruck, *3* Ablauf

2. Der Füllschieber (Bild 4.69) fährt in die vorderste Stellung und bleibt dort kurz stehen (Bilder 4.66 und 4.68a bis d). Nach einer vorwählbaren Zeit fällt der Unterstempel ab (Bild 4.68b), und die Matrize wird mit Masse gefüllt (Bilder 4.68c bis e). Anschließend fährt der Füllschieber wieder zurück (Bild 4.68e).



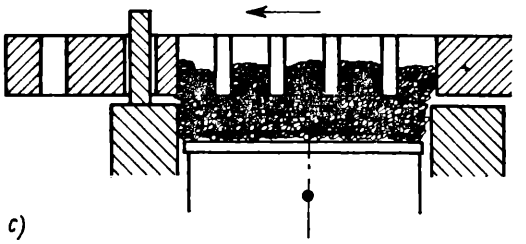
a)

1 Füllschieber, *2* Querstreifen, *3* beweglicher Abstreicher, *4* bewegliche Ausschieberleiste (kann auch als Abstreicher eingestellt werden), *5* Unterstempel, *6* Matrizenrahmen, *7* Füllschiebertisch, *8* beim vorangegangenen Lastspiel gepreßte Fliese



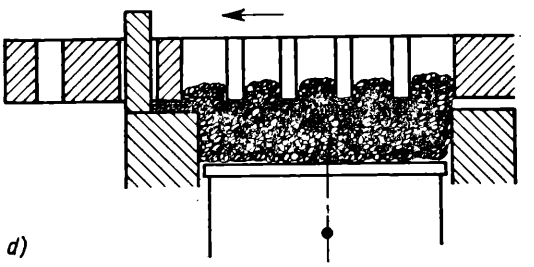
b)

Der Unterstempelfall wird der Geschwindigkeit des Füllschiebers derart angepaßt, daß der Unterstempel die unterste Lage erreicht, bevor der Füllschieber in der vordersten Stellung ist.



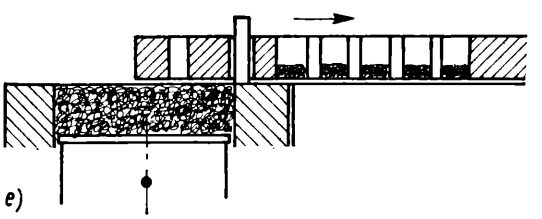
c)

Dadurch wird erreicht, daß die Querstreifen im Füllschieber die Masse nach vorn in die Matrize streichen.



d)

Es ist anzustreben, daß *ein* Querstreifen wenigstens bis zur vordersten Kante der Matrizenaussparung fährt. Dadurch wird als erstes die Vorderseite verdichtet.



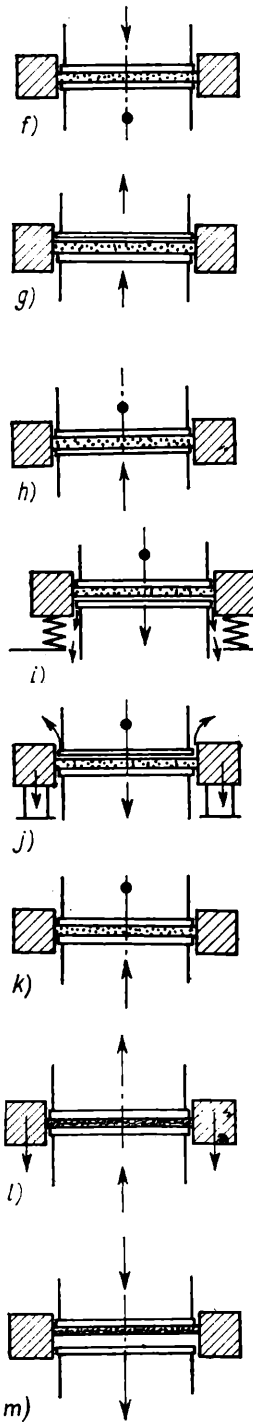
e)

Auf der Rückfahrt streift der lose Abstreicher die Masse nach hinten glatt.

Bild 4.68. Schematische Darstellung des Füll-, Preß- und Ausstoßvorganges [215] (Fortsetzung S. 190)

● Stillstand ⇄ Bewegung und Bewegungsrichtung
a) bis *e*) Füllvorgang, *f*) Vorverdichten, *g*) erste Entlüftung und eingeleitete Vorpressung, *h*) Vorpressung, *i*) zweite Entlüftung bei gefedertem Rahmen, *j*) zweite Entlüftung bei nicht gefedertem Rahmen, *k*) Hauptpressung, *l*) Ausstoß unter Druck, *m*) Ausstoß nicht unter Druck, *n*) Fliese ausgestoßen

(Fortsetzung Bild 4.68)



Der Oberstempel fährt mit etwa 10 kN Preßkraft (auf 2 Fliesen) nach unten.

Anheben des Oberstempels und Einklemmen der Sperre, gleichzeitig Vorpressung durch Ausfahren des Unterstempels. Vorpressung erfolgt langsamer, da die Kolbenfläche groß ist. Dadurch erreicht man die erste Entlüftung.

Vorpressung

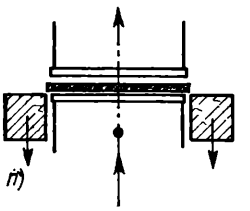
Entlüftung bei gefedertem Matrizenrahmen: Unterstempel fährt nach unten und löst sich von der Fliese.

Entlüftung bei nicht gefedertem Matrizenrahmen: Matrizenrahmen fährt mit dem Unterstempel nach unten und löst den Oberstempel von der Oberseite der Fliese ab.

Hauptpressung

Das Ausstoßen der Fliese muß meistens unter Druck erfolgen, so daß sich der Unterstempel nicht von der Fliese löst. Der Ausstoß wird gleichzeitig mit der Aufwärtsbewegung des Oberstempels durchgeführt.

—



Bei richtigem Ausstoßen der Fliese (was besonders bei nach herkömmlicher Art aufbereiteten Massen zu beachten ist) wird diese geringfügig aus der Preßform hüpfen, da sie vom Oberstempel durch den Sog mitgerissen wird.

3. Die Oberstempel (z. B. bei Zweifachmatrize) bewegen sich nach unten und verdichten die Preßmasse um etwa 40 % (s. Bild 4.60, Punkt *A*, und Bild 4.68f).
4. Die Sperrklötze fahren ein, um das Zurückweichen des Oberstempels zu verhindern (Ablauf parallel mit den Vorgängen auf Bild 4.68 g).
5. Die Fliese wird von unten gepreßt, s. auch Bild 4.67. Die Arbeitsgänge Vordruck (Bild 4.68h), Entlüftung (Bild 4.68i oder j) und Hauptdruck (Bild 4.68k) sind im notwendigen Bereich verstellbar. Der Füllschieber bleibt in der hinteren Stellung stehen.
6. Die Sperrklötze fahren heraus, damit die Oberstempel mit der Traverse wieder nach oben geführt werden können (Ablauf parallel mit den Vorgängen auf Bild 4.68l oder m). Der Ausstoß darf nicht zu früh erfolgen, da sonst die Sperrklötze eingeklemmt werden. Kommt er zu spät, können »Aufpresser« entstehen, oder die Fliese spaltet sich, da sie in der Matrize unter Zugspannung liegt.
7. Gleichzeitig drückt der Ausstoßer die Fliesen aus der Matrize heraus (Bild 4.68n).

Im folgenden soll der Aufbau des Füllschiebers näher erläutert werden (Bild 4.69).
Der Schieber wird von einem Hydromotor (*6*)

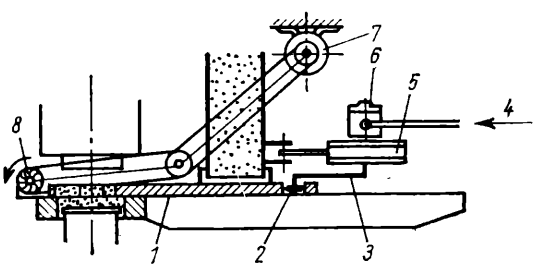


Bild 4.69. Funktion des Füllschiebers von Pressen des Typs PY [215]

1 Füllschieber, *2* verstellbare Rolle, *3* Kurbel, *4* Drucköl, *5* Getriebe, *6* Hydromotor, *7* E-Motor, *8* Putzbürste

über ein Getriebe (*5*) und eine umlaufende Kurbel (*3*) bewegt. Eine an der Kurbel befestigte verstellbare Rolle (*2*) greift in eine gerade Führungsbahn des Schiebers (*1*) und bewegt diesen bei einer Kurbeldrehung einmal vor- und rückwärts. In der hinteren Stellung wird der Schieber mit Masse aus dem Silo gefüllt (Bild 4.67).
An der Vorderseite des Füllschiebers ist eine rotierende Putzbürste (*8*) zur Reinigung der Oberstempel angeordnet. Sie wird von einem Elektromotor (*7*) über einen pendelnden Keilriementrieb angetrieben.
Mit der Presse PY 500 ist auch die Herstellung von Fliesen aus zwei verschiedenen Massen mit Hilfe von Doppelfülleinrichtungen möglich.
Die hydraulischen Pressen der Typenreihe PY eignen sich sowohl für die herkömmliche Technologie der Fliesenfertigung als auch in Verbindung mit angepaßten Nachfolgeaggregaten und Transporteinrichtungen für den Einsatz in Fließlinien unterschiedlicher Leistung. Bild 4.70 zeigt den schematischen Aufbau einer Fließlinie mit 3 Pressen vom Typ PY 500, die sich durch eine erhebliche Steigerung der Arbeitsproduktivität und eine bedeutende Senkung des Energiebedarfs gegenüber der herkömmlichen Technologie auszeichnet. Die technischen Daten der Fliesenpresse PY 500 enthält Tabelle 4.19.
Neben dem grundsätzlichen Verständnis der Funktionsweise einer Maschine und für die mit ihr zu realisierende Technologie ist es für den Praktiker von größter Bedeutung, sich

- mit Problemen bei der Bedienung der Anlage und
- den möglichen Fehlern am Erzeugnis, hier mit solchen, die durch die Formgebung entstehen,

vertraut zu machen.
An den Fliesen selbst können *Fehler* in vielfältiger Form auftreten, für die die Ursachen und Möglichkeiten ihrer Beseitigung genannt werden:

Preßrisse

Preßrisse laufen vom Rand aus über die Fliesen. Die Bruchkante ist uneben. Erkannt werden Preßrisse, wenn der Brand im Tunnelofen erfolgt und die Fließen gestapelt sind, meist erst nach dem Brennen, Anders verhält es sich beim Rollenofen (Durchlaufofen), wo Risse bereits nach dem Trocknen bemerkt werden können.

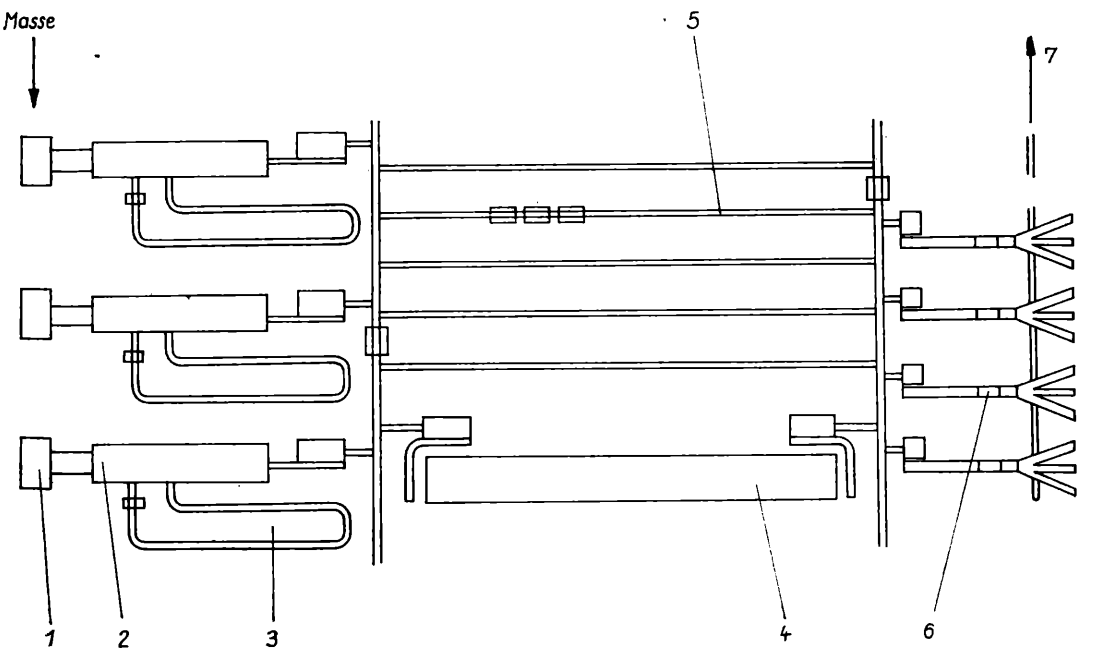


Bild 4.70. Schematischer Aufbau einer Fließlinie für Wand- und Bodenfliesen [215]

1 hydraulische Presse, *2* Schaukeltrockner, *3* Glasierlinie, *4* Schnellbrandofen, *5* Wochenendspeicher, *6* Sortier- und Verpackungsmaschine, *7* fertige Fliesen

Tabelle 4.19. Technische Daten der Fliesenpresse PY 500 [215]

Hubzahl, max.	
bei 12 mm Füllhöhe und Fliesen 150 × 150 mm	25 Hub/min
bei 22 mm Füllhöhe und Fliesen 150 × 150 mm	18 Hub/min
Füllhöhe, max.	55 mm
Preßkraft, max.	5,5 MN
Preßkraft im Dauerbetrieb	5,0 MN
installierte Leistung	36 kW
Kühlwasserverbrauch	0,8 $m^3 h^{-1}$ (15 °C)
Matrizeneinbaumaße	
Breite, max.	890 mm
Tiefe, max.	700 mm
Fördermenge der Hydraulik-Pumpenkombination	124 l min^{-1}
Niederdruck	3,0 MPa
Hochdruck	14,5 MPa
über Multiplikator	18,0 MPa
Hauptabmessungen	
Presse	
Länge	3500 mm
Breite	1900 mm
Höhe	3500 mm
davon Unterflur	800 mm
Hydraulikschrank ($L \times B \times H$),	2200 × 1220 × 2250 mm
Elektroschrank ($L \times B \times H$)	400 × 800 × 1200 mm
Masse gesamt	15350 kg

- Ursache
  - *a*) zu weiche Fliesen durch zu niedrigen Preßdruck
  - *b*) plastische Rohstoffe zu trocken
- Beseitigung
  - *a*) Hauptpreßkraft erhöhen
  - *b*) Plastische Rohstoffe mit höherem Feuchtigkeitsgehalt verwenden, gegebenenfalls Vorratsbehälter an der Presse leerfahren, damit überlagerte, zu trockene Rohstoffe entfernt werden

Füllrisse

Sie treten in der Mitte der Fliesen quer zur Ausstoßrichtung der Presse auf. Füllrisse sind im allgemeinen erst nach dem Brennprozeß zu erkennen. Einen Rückschluß auf eventuell auftretende Füllrisse läßt die Bestimmung der Dichteverteilung zu.

- Ursache

  zu frühes oder zu spätes Fallen der Unterstempel
- Beseitigung

  Änderung des Zeitpunktes des Füllens der Unterstempel durch Änderung der Fahnenstellung am induktiven Schalter

Eckrisse

Da Eckrisse mit bloßem Auge nur schwer zu erkennen sind, werden zur Sichtbarmachung Stichproben mit Petroleum eingepinselt.

- Ursache
  - *a*) einseitiges Lösen der Fliesen beim Ausstoßen
  - *b*) abgenutzte Formen
- Beseitigung
  - *a*) Einstellung des Ausstoßers korrigieren
  - *b*) Formen austauschen

Abgedrückte Kanten

- Ursache
  - *a*) schlechte Auflage des Unterstempels
  - *b*) angeklebte Masse an den Stempeln
  - *c*) Deformierung einer Stempelkante durch fälschliches Einfahren des Oberstempels in die leere Form
  - *d*) Transportschäden (Fliesenstapel geraten ins Wanken, und der Druck verlagert sich auf eine Kante. Die Schäden sind von den konkreten Umständen abhängig.)
- Beseitigung
  - *a*) Nacharbeiten des Unterstempels
  - *b*) Reinigen des Unterstempels
  - *c*) Auswechseln von Ober- und Unterstempel
  - *d*) gleichmäßiger Transport ohne hohe Beschleunigungen

Luftfliesen

Eine zu geringe Entlüftung der Preßmasse hat zur Folge, daß die Luft in der Fliese beim Preßvorgang komprimiert wird. Die Rückdehnung der Luft beim Nachlassen des Druckes führt zu Lagenrissen parallel zur Stempelfläche.

- Ursache
  - *a*) Druck zu hoch
  - *b*) Entlüftungszeit zu kurz
  - *c*) Füllung ungleichmäßig

d) zwischen Stempel und Form zu wenig Spielraum oder verklebt
e) zu hoher Staubanteil in der Masse

- Beseitigung
  a) Druck verringern
  b) Entlüftungszeit verlängern
  c) Füllschiebereinstellung bzw. Unterstempelfall korrigieren
  d) Spiel von Ober- und Unterstempel vergrößern
  e) Verwendung von Sprühkorn

Abgebrochene Ecken

- Ursache
  a) Formen zu stark verschlissen
  b) Oberstempel beschädigt
  c) Schaden durch zu starkes Verputzen des Preßgrates an der Fliese
- Beseitigung
  a) Formen auswechseln
  b) Oberstempel wechseln
  c) Neueinstellung der Werkzeuge, z. B. der Putzrädchen

Fliesen kleben an den Stempeln

- Ursache
  a) Stempel zu kalt
  b) Masse zu naß
  c) an Ober- und Unterstempel klebt Preßmasse
  d) Oberstempel beschädigt
- Beseitigung
  a) Stempelbeheizung überprüfen
  b) Masse mit geringerer Feuchtigkeit verwenden
  c) Preßwerkzeuge häufiger reinigen
  d) Oberstempel wechseln

Flecke

- Ursache
  Allgemeine Verunreinigungen des Preßmaterials, z. B. mit Schmiere oder Eisenabrieb, durch Reiben des Füllschiebers in der Form
- Beseitigung
  Entfernen der speziellen Ursache der Verunreinigung

Grat

- Ursache
  a) mangelhafte Einstellung der Preßwerkzeuge
  b) zu starker Grat infolge Abnutzung oder Beschädigung der Preßwerkzeuge
- Beseitigung
  a) Neueinstellung der Preßwerkzeuge vornehmen
  b) Ober- und Unterstempel wechseln

Trockener Ton oder Kaolin in der Rohfliese

Wird angetrockneter Ton oder Kaolin in die Fliese eingepreßt, führen diese Stellen aufgrund einer anderen Schwindung beim Trocknen und Brennen zu Senken in der Oberfläche des Scherbens.

- Ursache
  Die plastischen Rohstoffe setzen sich an Transporteinrichtungen und Bunkern ab, trocknen aus, lösen sich und geraten mit der feuchten Masse in die Presse.
- Beseitigung
  Regelmäßige Reinigung von Transporteinrichtungen und Bunkern sowie peinliche Sauberkeit.

Krumme (konkave oder konvexe) Fliesen

- Ursache
  a) schlechte Auflage der Unterstempel
  b) zu heiße Oberstempel
- Beseitigung
  a) Auflage verbessern oder Nacharbeit des Unterstempels
  b) Heizleistung der Patronen in den Oberstempeln verringern

Keilige Fliesen

Fliesen weisen im allgemeinen geringe Unterschiede in der Dicke der einzelnen Kanten auf. Beträgt diese Differenz mehr als 0,3 mm, ist die Fliese Ausschuß.

- Ursache
  a) unterschiedlich hohe Unterstempel, bedingt durch Abnutzung an der Anlagefläche der Unterstempel

b) unterschiedliches Füllen der Form
c) Oberstempel nicht gleichmäßig
d) Unterstempel fallen nicht zum richtigen Zeitpunkt

- Beseitigung
  a) neues Einrichten bzw. Nacharbeiten oder Austausch der Unterstempel
  b) Füllschiebereinstellung korrigieren bzw. Füllschieber auswechseln
  c) Nacharbeiten oder Austauschen der Oberstempel
  d) Einstellen des richtigen Zeitpunktes des Fallens der Unterstempel mittels Korrektur der Fahnenstellung am induktiven Schalter

Befallene Fliesen

Auf die Oberfläche der Fliesen gefallene Tonteilchen brennen fest und verursachen Unebenheiten auf der Fliese.

- Ursache

  Putzmaschine falsch eingestellt oder stark verschmutzt

- Beseitigung

  Neueinstellung, Reinigung oder Austausch der Putzmaschine

4.3.4.3. Viersäulenoberkolbenpresse PYH 500

Die Viersäulenoberkolbenpresse PYH 500 vom VEB Thuringia Sonneberg [215] wurde für den Einsatz in der Brennhilfsmittel- und der Feuerfestindustrie entwickelt. Sie findet in beiden Bereichen aufgrund ihrer universellen Bauweise vielseitige Anwendungsmöglichkeiten.
In der Brennhilfsmittelindustrie können mit ihr Kapseln, Platten, Stützen und dergleichen nach dem konventionellen statischen Preßverfahren gefertigt werden. Mit Hilfe einer Zusatzeinrichtung ist es aber auch möglich, Kapseln isostatisch zu pressen. Das Einsatzgebiet in der Feuerfestindustrie umfaßt die Formgebung einer Vielzahl einfacher und komplizierter Formsteine. Es können Massegranulate einer breiten Werkstoffpalette, wie z. B. Schamotte, Cordierit, Mullit, Silika, Magnesit usw., verpreßt werden.
Die Viersäulenoberkolbenpresse PYH 500 (s. Bild 4.71) ist eine hydraulische Presse. Die *Grundmaschine* besteht aus dem Pressengestell und dem Füllschieber. An diese Grundmaschine können für unterschiedliche Einsatzfälle Zusatzeinrichtungen angebaut werden. Das Pressengestell teilt sich in Unterteil und Oberteil, welche durch vier Säulen (*3*) (Dehnanker) gehalten werden. Zum Oberteil der Presse gehören im wesentlichen der Preßzylinder (*10*) mit den Naben zum Befestigen der Dehnanker, Preßkolben und das Nachsaugventil mit dem Ölvorratsbehälter (*11*). Preßzylinder und Unterteil bestehen aus Stahlguß. Der Preßkolben ist als Plunger ausgebildet. Er erzeugt bei einem hydraulischen Druck von 31,5 MPa die maximale Preßkraft von 5000 kN. Die Preßkolbenunterseite ist an der oberen Traverse (*8*) befestigt. Die Traverse wird an den vier Säulen geführt. Ihre Führungselemente sind nachstellbar ausgebildet. Die Führungsbänder aus Miramid können bei größerem Verschleiß leicht ausgewechselt werden. Die Laufflächen an den Säulen sind oberflächengehärtet und feinstgeschliffen.
An der Unterseite der Traverse befindet sich eine Aufnahmeplatte (*7*) zum Befestigen des Oberstempels (*6*). Die Eilgangbewegungen aufwärts und abwärts für den Oberstempel werden durch zwei an beiden Seiten des Preßzylinders befestigte hydraulische Arbeitszylinder (*16*) erzeugt.
Auf dem Preßzylinder (*10*) ist der Ölvorratsbehälter (*11*) angeordnet. Aus diesem wird bei der Eilgangbewegung des Oberstempels nach unten Öl über ein Füllventil in den Druckraum des Preßzylinders nachgesaugt. Die Betätigung des Füllventils erfolgt durch einen hydraulischen Arbeitszylinder. Bei der sich an den Preßvorgang anschließenden Aufwärtsbewegung wird das Öl wieder in den Ölbehälter zurückgedrückt. Überschüssiges Öl fließt durch ein Überlaufrohr in das Hydraulikaggregat ab. Ein Füllstandsschalter im Ölvorratsbehälter kontrolliert den Ölstand und schaltet die Presse bei Unterschreitung eines minimalen Ölstandes aus.
Der Pressentisch (*4*) wird ebenfalls an den vier Säulen geführt. Seine Führungselemente sind nachstellbar ausgebildet. Der Pressentisch dient zur Aufnahme des Werkzeugrahmens (*5*). Seine Bewegungen werden über zwei seitlich angeordnete hydraulische Arbeitszylinder (*9*) gesteuert.

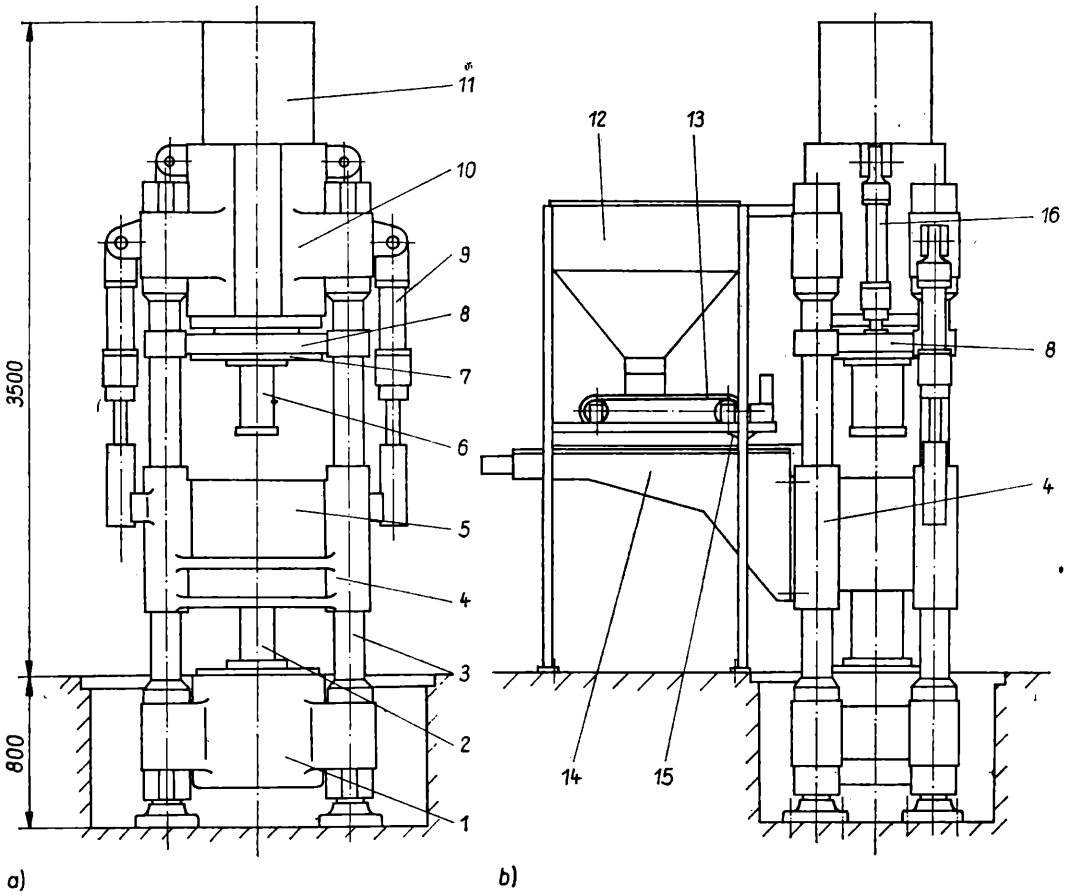


Bild 4.71. Pressengrundmaschine der Viersäulenoberkolbenpresse PYH 500 [215]

a) Vorderansicht, *b*) Seitenansicht

1 Unterteil, *2* Unterstempel, *3* Säule, *4* Pressentisch, *5* Werkzeugrahmen, *6* Oberstempel, *7* Aufnahmeplatte für Oberstempel, *8* Traverse, *9* Arbeitszylinder zum Steuern des Pressentisches, *10* Preßzylinder, *11* Ölvorratsbehälter, *12* Massesilo, *13* Zuteilband, *14* Füllschieber, *15* Klappe, *16* Arbeitszylinder mit Eilgangbewegung des Oberstempels

An der hinteren Seite des Pressentisches ist der Füllschiebertisch befestigt. Auf diesem gleitet, durch Rollen geführt, der Schieber (*14*) mit dem Füllkasten. Der Antrieb erfolgt auch hier durch einen hydraulischen Arbeitszylinder. Der Unterstempel (*2*) kann sich nicht bewegen. Er ist fest auf dem Unterteil (*1*) montiert. Deshalb muß der Ausstoßvorgang des Preßlings durch Abziehen des Werkzeugrahmens (*5*) erfolgen, d. h., der Pressentisch (*4*) mit dem Werkzeugrahmen wird hydraulisch nach unten gedrückt.

Die Presse besitzt eine volumetrische *Massefüllvorrichtung*. Die Massezuführung zum Füllkasten erfolgt in der hinteren Stellung des Füllschiebers (*14*) von einem Massesilo (*12*) über ein gesteuertes Zuteilband (*13*). Das Zuteilband bewegt sich unterhalb der Auslaßöffnung des Silos vorbei und zieht ein Masseband aus diesem heraus. Die Dicke des Massebandes ist einstellbar. Die Regulierung der Massemenge im Kasten des Füllschiebers erfolgt durch einen kapazitiven Meßfühler. Dieser schaltet bei Erreichen des erforderlichen Massestandes im Füllkasten das Zuteilband ab. Zusätzlich kann stufenlos regelbar über ein Zeitrelais für das Zuteilband eine Nachlaufzeit eingestellt werden. Damit lassen

sich Masseschwankungen bei laufender Maschine ausgleichen. Das Zuteilband wird durch einen Bremsgetriebemotor angetrieben. Um ein Nachrieseln von Masse und die Verunreinigung des Füllschiebertisches bei Füllschieberfahrt zu vermeiden, befindet sich an der Vorderseite des Zuteilbandes eine Klappe (*15*). Diese ist in der Ruhestellung nach unten geschwenkt und fängt eventuell vom Zuteilband herabrieselndes Massegranulat auf. Beim Beschicken des Füllschieberkastens schwenkt die Klappe nach oben und entleert die aufgefangenen Masseteile mit in den Kasten.

Zur Lösung spezifischer Aufgaben, z. B. Herstellung von Preßlingen mit komplizierter Geometrie, sind folgende *Erweiterungsmöglichkeiten* vorgesehen:

- Unterstempelanhebung zum Füllausgleich bei Preßlingen mit unterschiedlichen Dicken; dazu sind wahlweise ein oder zwei parallelgeschaltete Arbeitszylinder einsetzbar;
- Formanschlag zum Pressen konischer Steine; an beiden Seiten der Presse betätigen parallelgeschaltete Arbeitszylinder Sperren zur Begrenzung der Abwärtsbewegung des Pressentisches;
- Schabloniervorrichtung für Kapseln und ähnliche rotationssymmetrische Preßlinge mit Oberflächenvertiefungen; die Drehzahl der Schablone ist stufenlos regelbar zwischen 10 bis 80 min^{-1}, die Rotationszeit der Schablone von 0 bis 5 s;
- Oberstempelputzvorrichtung für Kapseln;
- Isostatikpreßeinrichtung für Kapseln;
- Austragvorrichtung für Formsteine; es handelt sich um pneumatisch betätigte Greifer, die am Füllschieber befestigt sind und während der Füllschieberfahrt nach vorn die Steine aus dem Preßbereich transportieren und außerhalb absetzen.

Im folgenden soll die *Isostatikpreßeinrichtung* etwas näher beschrieben werden, obwohl die speziell dafür konstruierten Anlagen erst in Abschnitt 4.3.6. behandelt werden.

Zu der Isostatikbaugruppe gehören neben dem isostatischen Preßwerkzeug noch die Hydraulik zur Erzeugung des isostatischen Druckes und dessen Steuerung sowie die Absaugvorrichtung des Öls unter der Membran nach dem Preßvorgang. Letztere sind zu einem Aggregat zusammengefaßt, das unmittelbar neben der Presse PYH 500 aufgestellt werden kann. Die Druckölversorgung erfolgt von einer Axialkolbenpumpe aus dem Hydraulikschrank der Presse.

Das Aggregat beinhaltet einen einfachwirkenden Drucksübersetzer mit einem entsperrbaren Rückschlagventil und eine Arbeitszylinderkombination zum Absaugen des Öls unter der Membran. An seiner Rückseite ist die Steuersäule mit den Wegeventilen angeordnet. Der Drucksübersetzer hat ein Flächenverhältnis von 4:1, so daß ein Niederdruck von 12,5 MPa auf den max. isostatischen Preßdruck von 50 MPa übersetzt werden kann.

Der prinzipielle Arbeitsablauf für das isostatische Pressen ist im folgenden dargelegt:

Der Pressentisch (*4*) mit dem Werkzeugrahmen (*5*) fährt in Füllstellung und wird durch eine Sperre nach unten verriegelt. Die Membran für die isostatische Druckübertragung ist im Unterstempel (*2*) angeordnet. Nachdem der Füllschieber (*14*) eine vordosierte Granulatmenge in das Werkzeug eingebracht hat, fährt von der Seite die Schabloniervorrichtung über das Werkzeug. Diese verteilt die Masse entsprechend dem oberen Profil der Kapsel und kehrt dann in ihre Ausgangsstellung zurück. Anschließend erfolgt das Schließen des Werkzeugs durch Absenken des Oberstempels (*6*). Das Werkzeug bleibt während der nachfolgenden isostatischen Verdichtung mit maximaler Preßkraft geschlossen.

Der isostatische Druckaufbau im Werkzeug erfolgt in zwei Stufen:

1. Stufe mit Niederdrucköl aus dem Steuerkreislauf mit einem Druck bis 5 MPa,
2. Stufe mit dem Drucksübersetzer zur Erzeugung des isostatischen Enddruckes bis max. 50 MPa.

Nach einer wählbaren Druckhaltezeit setzt der regelbare Druckabbau im Werkzeug ein. Der Drucksübersetzer fährt dann in seine Ausgangsstellung zurück, und das Restöl unter der Membran wird abgesaugt. Der Antrieb des Absaugzylinders erfolgt durch einen hydraulischen Arbeitszylinder. Ist der Absaugvorgang beendet, wird das Öl während der Rückwärtsbewegung des Arbeitszylinders über eine Rückschlagventilkombination in den Ablauf gedrückt. Parallel

zum Absaugen wird der Oberstempel entlastet und hochgefahren.
Nach dem Entriegeln der Sperre kann der Pressentisch nach unten gezogen und anschließend der Preßling entnommen werden.
Die verschiedenen Einsatzgebiete für die PYH 500 und die komplizierten technologischen Aspekte bedingen mannigfaltige *Steuerkombinationen* der hydraulischen, elektrischen und pneumatischen Antriebe. Aufgrund der Kompliziertheit und Variabilität wurde als Steuerung die TMS 80 (Thuringia Maschinensteuerung [215]) verwendet. Die TMS 80 ist eine freiprogrammierbare Steuerung, die als Kernstück die Module

- Zentrale Recheneinheit (ZVE K 2521),
- Operativ- und Festwertspeicher (OFS K 3620) und
- Programmierbare Festwertspeicher (K 3820)

enthält. Als Ein- und Ausgabe-Schnittstelle dient die PIO-Baugruppe mit den entsprechenden digitalen Ein- und Ausgangskarten. Die Steuerung gestattet darüber hinaus eine Verarbeitung analoger Signale und Impulsfolgen. Zur Kommunikation zwischen Mensch und Maschine dient das Bedientableau mit der entsprechenden Anschlußsteuerung.
Das *Bedientableau* ist mit 48 Funktionstasten, 16 Vorwahlschaltern und einer 16stelligen Siebensegmentanzeige ausgestattet. Über die Taster erfolgen Start und Stop der verschiedenen Programme, und es können einzelne hydraulische Funktionseinheiten für Einricht- und Eichzwecke verfahren werden.
Über die Vorwahlschalter erfolgt die Eingabe der prozeßspezifischen Daten, wie z. B. die Soll-Dicke des Preßlings, Füllfaktor für den internen Füllhöhenregelkreis, Zeitkonstanten usw. Die Siebensegmentanzeige gibt dem Bediener über die angewählte Programmart, die Ist-Dicke des Preßlings, Hubzahl und die durchlaufenen Maschinenzyklen (was vor allem bei Havarie für die Fehlerlokalisierung wichtig ist) Auskunft. Die Informationen werden über eine Interruptroutine im Multiplexbetrieb der Zentralen Verarbeitungseinheit zur Verfügung gestellt.
Zur Verbesserung der dynamischen Eigenschaften der Maschine wurden *Proportionalventile* eingesetzt. Die Ansteuerelektronik für die Ventile stellt eine separate Funktionseinheit dar. Sie umfaßt ein Netzgerät, eine Verstärkerbaugruppe mit integriertem Rampengenerator und einen Festwertspeicher. Die Ansteuerung der Verstärkerbaugruppe und die Sollwertauswahl erfolgen über die digitale Ausgabebaugruppe programmgesteuert.
Die *Füllhöhenregelung* kann manuell oder von Initiatoren gesteuert werden. Eine zusätzliche Möglichkeit zur Regelung besteht in der Nutzung der inkrementalen Meßsysteme, welche am Oberstempel und Tisch angeordnet sind. Die Auswertung dieser Impulsfolgen erfolgt mit einer speziellen Logik, welche ebenfalls zum Leistungsumfang der TMS 80 gehört.
Damit ist auch auf eine relativ einfache Weise die Ist-Wert-Erfassung des Preßlings über die Siebensegmentanzeige möglich.
Die *Software* wurde auf dem Mikrorechner MC80, Hersteller VEB Elektronik Gera, erstellt, statisch getestet und auf EPROM abgelegt. Die Programmerstellung für die Maschinensteuerung erfolgte mit Hilfe von Programmablaufgraphen in Assemblersprache.
Weiterhin steht dem Anwender ein Serviceprogrammpaket zur Verfügung, das die Testung der Baugruppen ermöglicht und vom Bedientableau aus angewählt werden kann.
Im *Hydraulikteil* ist die Presse mit einer modernen elektrohydraulischen Steuerung ausgerüstet. Das Antriebsaggregat umfaßt den Ölbehälter und die Pumpen mit ihrer Steuerung. Die Wegeventilblöcke sind an der Presse angeordnet. Als Hauptantrieb gelangen zwei verstellbare Axialkolbenpumpen 100/32 zum Einsatz. An diesen ist je eine Sperrschieberpumpe 25/16 angeflanscht, die mit einer dritten Sperrschieberpumpe 40/16 zum Niederdruckkreislauf mit einem Arbeitsdruck von max. 8 MPa zusammengefaßt sind. Die Hydrauliksteuerung arbeitet ohne Druckspeicher. Die für die einzelnen Bewegungsvorgänge benötigte Ölmenge wird durch Zu- oder Abschalten der Sperrschieberpumpen bzw. durch Verstellen der Axialkolbenpumpen geregelt. Mit dieser Maßnahme kann die Verlustleistung (Wärmeentwicklung) sehr gering gehalten werden.
Die Steuerung der Bewegungsvorgänge im Niederdruckbereich (Nebenbewegungen) erfolgt durch zu Steuersäulen zusammengefaßte Wegeventile nach TGL 26223. Um für die Hauptarbeitsvorgänge (Oberstempel-, Pressentisch- und Füllschieberbewegungen) günstige dynami-

sche Verhältnisse zu schaffen, wurden dort 2-Wege-Einbauventile nach TGL 37068 und Proportionalventiltechnik nach TGL 55074 sowie TGL 55080 eingesetzt. Der Antrieb beim Pressen und Ausstoßen erfolgt direkt von den beiden Axialkolbenpumpen. Für das Vorpressen können im Niederdruckbereich die Sperrschieberpumpen dazugeschaltet werden. Der Preßdruck läßt sich stufenlos einstellen. Die Geschwindigkeit aller Bewegungsabläufe, einschließlich des Preßvorganges, ist sowohl im Arbeitsgang als auch im Eilgang stufenlos regelbar.

Im folgenden wird die *Steuerung des Preßvorganges* beschrieben. Die Abwärtsfahrt des Oberstempels erfolgt bis zum Schließen des Preßwerkzeuges im Eilgang durch die beiden seitlich angeordneten Arbeitszylinder, wobei das Öl für den Preßzylinder über das Füllventil nachgesaugt wird. Kurz vor dem Schließen des Werkzeuges erfolgt das hydraulische Abbremsen des Oberstempels. Gleichzeitig wird die vorgewählte Geschwindigkeit für das Pressen zugeschaltet. Der Preßvorgang kann durch wahlweise bis zu drei Entlüftungshübe – weg- oder druckabhängig – unterbrochen werden.

Zwei Druckschalter, bezeichnet mit PD_{min} und PD_{max}, überwachen den Preßdruck. Das Abschalten des Preßdruckes kann wahlweise ebenfalls druck- oder wegabhängig erfolgen. Bei gewählter *druckabhängiger* Preßdruckabschaltung schaltet sich die Anlage bei Erreichen des PD_{min} auf eine kleine Preßgeschwindigkeit um. Beim Schalten des PD_{max} wird der Preßvorgang abgeschaltet bzw. die Preßdruckstandzeit zugeschaltet.

Bei gewählter *wegabhängiger* Preßdruckabschaltung initialisiert die Umschaltung auf kleinste Preßgeschwindigkeit entweder ein Endschalter oder der Druckschalter PD_{min}, je nachdem, welcher der beiden Schalter zuerst erreicht wird. Analog dazu erfolgt die Preßdruckabschaltung von einem zweiten Endschalter oder dem Druckschalter PD_{max}. PD_{max} schaltet nur dann den Preßdruck ab, wenn der zweite Endschalter nicht erreicht wurde. Das bedeutet, kaß dann die Steindicke im oberen Toleranzbereich liegt oder der Stein sogar zu dick ist. Dann muß die Füllhöhe für den nachfolgenden Preßzyklus korrigiert werden. Nach Beendigung des Preßvorganges fährt der Oberstempel bis zur Preßwerkzeugoberkante im Feingang hoch und anschließend im Eilgang bis zur oberen Ruhelage.

Die *Steuerung des Pressentisches* hat während des gesamten Arbeitsspieles ebenfalls einige wichtige Aufgaben zu erfüllen. Zum Erreichen der Füllhöhe fährt der Pressentisch mit dem Werkzeugrahmen bis zu einem wählbaren Punkt nach oben. Der dabei entstandene Abstand zwischen der Oberkante des Werkzeugrahmens und dem feststehenden Unterstempel bildet die Füllhöhe. Diese Füllhöhe errechnet sich aus dem Steindickenendmaß, multipliziert mit einem masseabhängigen Füllfaktor, s. Gl. (4.1).

Nach dem Einfüllen des Massegranulats kann der Pressentisch wahlweise um einen beliebigen Betrag nach oben gefahren werden (relatives Absenken der Masse). Es ist weiterhin möglich, während der Füllschieberrückwärtsfahrt den Pressentisch zum keiligen Füllen des Werkzeuges wahlweise aufwärts oder abwärts mit einer stufenlos einstellbaren Geschwindigkeit zu bewegen. Zwecks Preßzonenverlagerung kann der Pressentisch während der Entlüftungszeiten wahlweise um einen beliebigen Betrag nach unten verzogen werden.

Die Konstruktion läßt es außerdem zu, die Preßform während des Preßvorganges wahlweise schwimmend oder gesteuert abzudrücken, s. auch Abschnitt 3.3.3.3. Bei der Arbeitsweise »schwimmend abdrücken« ist der Haltedruck in den Arbeitszylindern für den Pressentisch entsprechend der Masse des Pressentisches und des Werkzeugrahmens eingestellt. Infolge der durch den Preßvorgang hervorgerufenen Verdichtung des Massegranulates entsteht an der Werkzeugwand eine Reibungskraft. Überwindet diese die durch den Haltedruck in den Arbeitszylindern eingestellte Gegenkraft, so wird der Pressentisch mit nach unten gezogen.

Bei der Arbeitsweise »gesteuert abdrücken« wird der Pressentisch mit Hilfe der beiden Arbeitszylinder parallel zum Pressen mit einer stufenlos wählbaren Geschwindigkeit abwärts gedrückt. Das Absenken des Werkzeugrahmens bewirkt eine gleichmäßigere Dichte über der gesamten Preßlingsdicke, s. Abschnitt 3.3.2.1.

Nach dem Pressen wird der Pressentisch zum Zwecke des Freisetzens des Preßlings (Ausstoß) nach unten gedrückt. Er fährt dabei so weit nach unten, daß die Oberkante des Werkzeugrahmens

etwa 5 bis 10 mm unterhalb der Oberkante des Unterstempels steht.

Der Ausstoßvorgang kann wahlweise mit oder ohne Auflast erfolgen. Als Auflast ist dabei das Eigengewicht von Oberstempel, Traverse und Preßkolben zu verstehen.

Weitere wichtige Elemente der PYH 500 sind die *Steindickenmessung* und die *Füllhöhenkorrektur*. Die Steindicke kann elektronisch gemessen und optisch am Bedientableau angezeigt werden. Die Steindickenmessung erfolgt nach der Druckentlastung des Hauptpreßzylinders, um die Rückdehnung des Preßlings mit zu erfassen. Es wird der Abstand zwischen Unterstempel und Oberstempel mit einem inkrementalen Längenmeßsystem ermittelt.

Das zweite Meßsystem erfaßt zur Regelung der Füllhöhe den Abstand zwischen Unterstempel und Oberkante des Werkzeugrahmens. Die Füllhöhe kann während des Betriebes der Presse wahlweise von Hand oder automatisch verändert werden. Die automatische Füllhöhenkorrektur erfolgt nach den beiden Möglichkeiten der Preßdruckabschaltung entweder druckabhängig oder wegabhängig. Der Füllfaktor ist je nach eingesetztem Massegranulat zwischen 1,0 und 2,0 in der Stufung 0,1 wählbar.

Bei Preßdruckabschaltung »druckabhängig« wird die Istdicke mit der eingegebenen Solldicke verglichen, die Abweichung mit dem gewählten Füllfaktor multipliziert und die Füllhöhe um diesen Betrag für den nächsten Preßvorgang verändert.

Bei Preßdruckabschaltung »wegabhängig« wird die Füllhöhe wie folgt korrigiert: Wird bei Preßdruckabschaltung durch den Endschalter der Druckschalter PD_{min} nicht erreicht, muß die Füllhöhe um einen in der Größe wählbaren Schritt vergrößert werden. Wird der Druckschalter PD_{min} erreicht, PD_{max} aber nicht, so liegt der Stein in der Toleranz, und es erfolgt keine Korrektur.

Schaltet der Druckschalter PD_{max} den Preßdruck ab, ohne daß der Endschalter erreicht wurde, so ist der Stein zu dick, und die Füllhöhe muß verringert werden.

Tabelle 4.20 zeigt zusammengefaßt einige technische Daten der Viersäulenoberkolbenpresse PYH 500.

Tabelle 4.20. Technische Daten der Viersäulenoberkolbenpresse PYH 500 [215]

Preßkraft	5000 kN
Ausstoßkraft	600 kN
Hubzahl, max. (für Normalsteine 65 mm hoch)	6 Hub/min
Hub des Preßkolbens, max.	500 mm
Füllhöhe, max.	300 mm
Werkzeugrahmenabmessungen ($B \times L$)	720 × 640 mm
Stempelfläche, max.	580 × 400 mm
installierte Antriebsleistung	50 kW
Masse (ohne Hydraulik- und Elektroschrank)	16500 kg
Flächenbedarf	12 m²
erforderlicher Mindestdruck für Druckluft	0,5 MPa
Druckluftbedarf	12 dm³ min⁻¹
Hydraulik	
Niederdruck (Steuerkreislauf)	5 MPa
Hochdruck (Pressen, Ausstoß)	31,5 MPa
Spezielle Parameter für das Isostatikteil	
isostatischer Preßdruck, stufenlos, max., regelbar	50 MPa
Haltezeit des isostatischen Preßdruckes, regelbar	0...5 s
isostatischer Druckabbau, regelbar	0...5 s

4.3.5. Drehtischpressen

Die in vielen Bereichen der Keramik eingesetzten Drehtischpressen haben ihre Bezeichnung durch die Anordnung mehrerer Formen in einem Drehtisch. Der Drehtisch kann sich taktweise oder stetig bewegen. Stetig arbeitende Maschinen sind mit umlaufenden Unter- und Oberstempeln ausgerüstet.

Bild 4.72 zeigt den Bewegungsablauf der Ober- und Unterstempel einer Hochleistungsrundlaufpresse.

Solche Maschinen werden für den Einsatz in der technischen Keramik, insbesondere für Erzeugnisse kleinster Abmessungen, entwickelt, z. B. um aus Trockenpreßmasse Rechteckferritkerne der Größen 0,5 bis 0,8 mm zu fertigen. Die gepreßten Kerne genügen besonders hohen Anforderungen hinsichtlich Masse- und Maßtoleranzen.

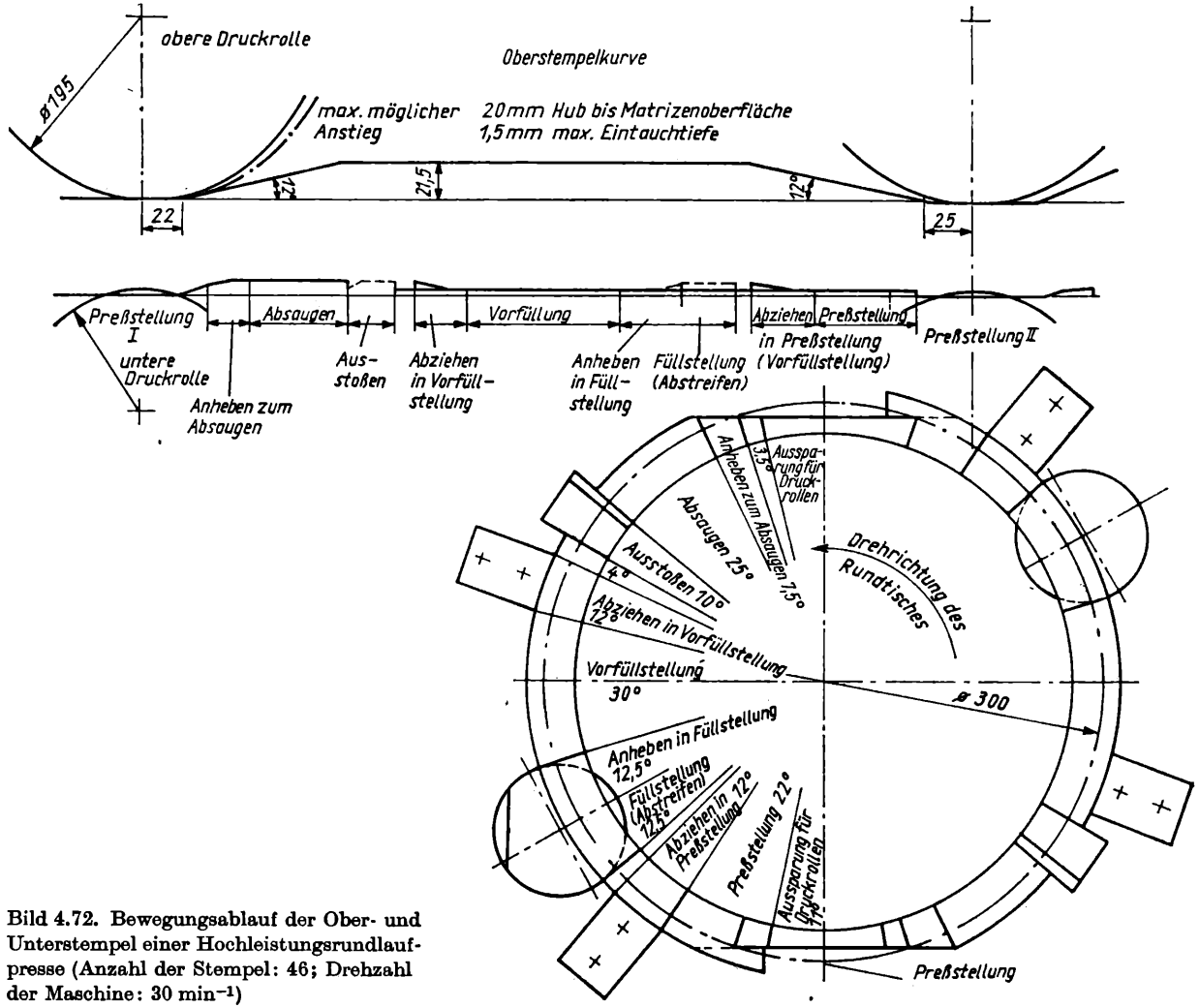


Bild 4.72. Bewegungsablauf der Ober- und Unterstempel einer Hochleistungsrundlaufpresse (Anzahl der Stempel: 46; Drehzahl der Maschine: 30 min^{-1})

Das Grundprinzip der Maschinen besteht darin, daß ein mit einer großen Anzahl an Preßwerkzeugen ringförmig bestückter Rundtisch (beispielsweise 28 bis 46 Preßwerkzeuge) stetig durch zwei um 180° versetzt angeordnete Preßstationen mit federnden und höhenveränderlichen Ober- und Unterpreßrollen gedreht wird, wodurch die Preßwerkzeughalter gegeneinander in die Preßstellung gedrückt werden. Die Bewegung der Oberstempel erfolgt dabei außerhalb des Druckbereichs durch eine feste Kurve, während für die Unterstempelbewegung neben festen Kurvensegmenten für Vorfüllung, Füllhöhe und Ausstoßweg sehr genaue Einstellmöglichkeiten vorhanden sind. Die Wegleitung der überschüssigen Masse bzw. das Abschieben der ausgehobenen Preßlinge wird mittels Leitschienen vorgenommen.

Sowohl der Rundtisch als auch die Werkzeughalter sind gehärtet und bestehen aus verschleißfestem Material, wobei die Hartmetall-Preßwerkzeuge austauschbar sind.

Die gewünschte Drehzahl des Rundtisches ist je nach Typ und zu fertigendem Erzeugnis im Bereich von etwa 10 bis 40 min^{-1} einstellbar. Der Antrieb kann auf ein stufenlos regelbares Kettengetriebe mit einem Regelbereich von etwa 1:4,5 wirken. Die Antriebsbewegung des Kettengetriebes wird dann durch Keilriemen auf eine Schneckenradwelle übertragen, die mittels Elektromagnet-Einflächenkupplung schaltbar ist.

Die Leistung, die eine Rundlaufpresse in Abhängigkeit von der Drehzahl des Rundtisches bereits für niedrige Drehzahlen erreicht, wird in Bild 4.73 gezeigt. Daraus ist die extrem hohe Produktivität von Rundlaufpressen zu erkennen. Aus diesem Grunde sind Rundlaufpressen auch nur in einer Massenfertigung sinnvoll einzusetzen. Für die Drehzahl des Rundtisches besteht eine von der Masse und dem Erzeugnis abhängige, obere Grenze. Einige technische Daten für gebräuchliche Rundlaufpressen können Tabelle 4.21 entnommen werden.

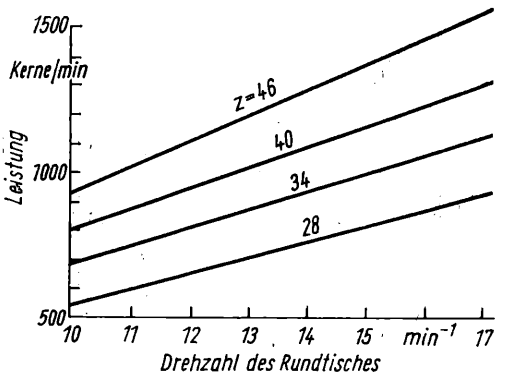


Bild 4.73. Leistungsmöglichkeit einer gegebenen Rundlaufpresse in Abhängigkeit von der Drehzahl des Rundtisches und der Anzahl z der Preßwerkzeuge

Tabelle 4.21. Auswahl einiger typischer technischer Daten für Rundlaufpressen

Preßkraft	bis 1 kN
Ausstoßkraft	bis 1,5 kN
Oberstempelhub	max. 21,5 mm
Unterstempelhub	max. 0,6 mm
Füllhöhe	bis 0,6 mm
Anzahl der Preßstationen	2
Anzahl der Werkzeughalter	28...46
Drehzahl des Rundtisches, stufenlos einstellbar	10...40 min^{-1}
Betriebsspannung und -frequenz	380 V; 50 Hz
theoretische Leistung	55000...165000 Stück/h

In der Ziegel- und der Feuerfestindustrie trifft man noch hin und wieder auf Drehtischpressen, die für große Formate und höhere Preßkräfte ausgelegt sind. Sie weisen z. B. typische Kurvensteuerungen auf, wie in Bild 4.74 an einem Beispiel gezeigt wird, und sind sehr robust gebaut.

Neben Drehtischpressen mit mechanisch (kurven-) gesteuerten Preßeinrichtungen sind auch Pressen im Einsatz, die nach dem Kniehebelprinzip oder hydraulisch gesteuert arbeiten.

4.3.6. Pressen für isostatisches Verdichten

4.3.6.1. Vorbemerkungen

Für das isostatische Verdichten werden je nach Einsatzgebiet verschiedene Anlagentypen und Spezialmaschinen entwickelt.

Den Arbeitsablauf einer kompletten Kalt-Isostatik-Produktionsanlage zeigt Bild 4.75. Mit dieser Anlage können Feuerfesterzeugnisse, wie

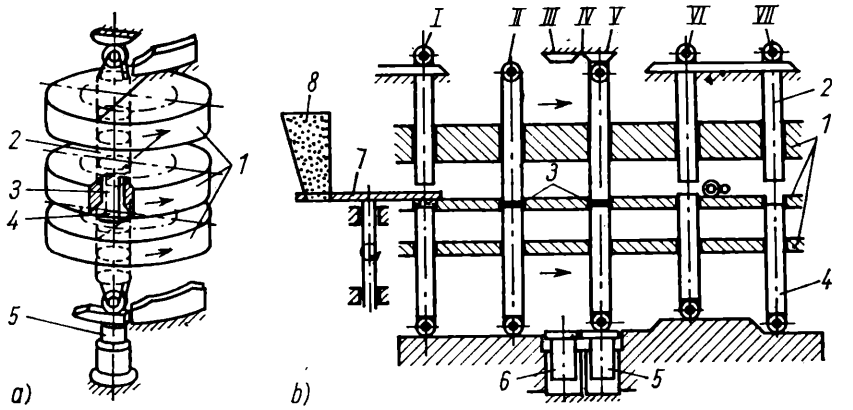


Bild 4.74. Prinzip der Kurvensteuerung an einer Drehtischpresse [133]
a) Arbeitsprinzip, *b*) Arbeitsprogramm, abgerollt
1 Drehtisch, *2* Oberstempel, *3* Preßling, *4* Unterstempel, *5* Kolben für die Hauptpreßkraft, *6* Kolben für die Vorpreßkraft, *7* Füllschieber, *8* Silo

I	Füllen	*III*	2. Vorpressen	*V*	Fertigpressen	*VII*	Reinigen
II	1. Vorpressen	*IV*	Entlüften	*VI*	Ausstoßen		

Steine, Rohre, Pfannen, Platten u. a., hergestellt werden.
Im Bild 4.76 ist das Schema der Gasdruckanlage einer Heiß-Isostatik-Presse dargestellt.
Die Realisierung des isostatischen Pressens in Spezialmaschinen ist jedoch sehr zeitaufwendig und im Vergleich mit dem Arbeitsablauf, z. B. in statisch wirkenden hydraulischen Pressen, wenig produktiv. Deshalb wurde für die Massenfertigung von runden oder ovalen, dünnwandigen Teilen (z. B. Teller) das Verfahren dahingehend abgewandelt, daß der isostatische Preßdruck nur von einer Seite auf den Preßling einwirkt. Die Gegenseite bildet ein starrer Stahlstempel, der plastbeschichtet ist. Solche Werkzeuge lassen sich in bisher verwendete modifizierte Pressensysteme einbauen und wie statisch wirkende Preßwerkzeuge mit Ober- und Unterstempel betreiben.
Dieses Prinzip wurde auch dem isostatischen Pressen von Kapseln zugrunde gelegt, wie es in Abschnitt 4.3.4.3. beschrieben ist.
Im folgenden werden weitere Varianten von isostatischen Pressen vorgestellt.

4.3.6.2. Isostatische Trockenpresse »isomat«

Die isostatischen Trockenpressen vom Typ »isomat« werden in den Ausführungen PIT 250 und PIT 500 hergestellt. Bild 4.77 zeigt schematisch diese Anlage der Firma Dorst – Keramikmaschinenbau [218] zur Fertigung von Flachgeschirr auf der Grundlage des einseitigen isostatischen Trockenpressens. Die Druckübertragung auf den Preßling ist Bild 3.73 zu entnehmen.
Der durch ein Spezialschaltgetriebe periodisch vorrückende Pressentisch trägt insgesamt vier Unterwerkzeuge mit je einer Membran, die jeweils der Rückseite des herzustellenden Tellers annähernd entspricht. In der *Füllstation* gelangt das volumetrisch vordosierte Granulat zentrisch auf die Membran und wird mittels einer rotierenden Schablone entsprechend der Tellerform über die gesamte Membranfläche verteilt. In der *Preßposition* verschließen abwechselnd zwei Oberstempel zur Formung der Tellerspiegel den Füllraum, worauf die Membran nach einem vorgegebenen Programm von unten mit dem isostatischen Druck beaufschlagt wird. Das auf der Membran liegende Granulat wird gegen den Oberstempel gepreßt und verdichtet. In der *Abnahmestation* wird der isostatisch gepreßte Teller von der Membran abgehoben und einer synchron mit dem Pressentisch umlaufenden Putzvorrichtung übergeben. Die vierte Position »*Einrichten*« dient einerseits dem automatischen Säubern der Membran von Granulatresten, zum anderen können hier bei Modellumstellungen die Membranen und die Stützringe der Un-

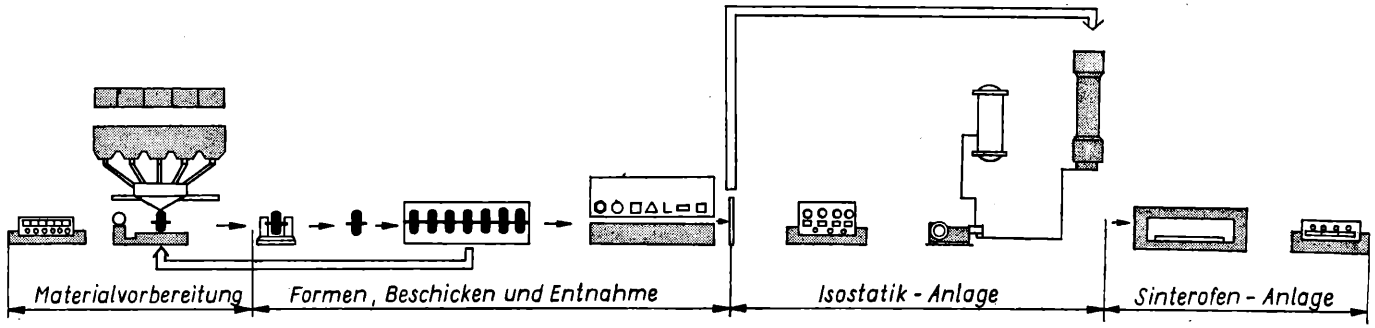


Bild 4.75. Schema des Arbeitsablaufes für eine komplette Kaltisostatik-Produktionsanlage [228]

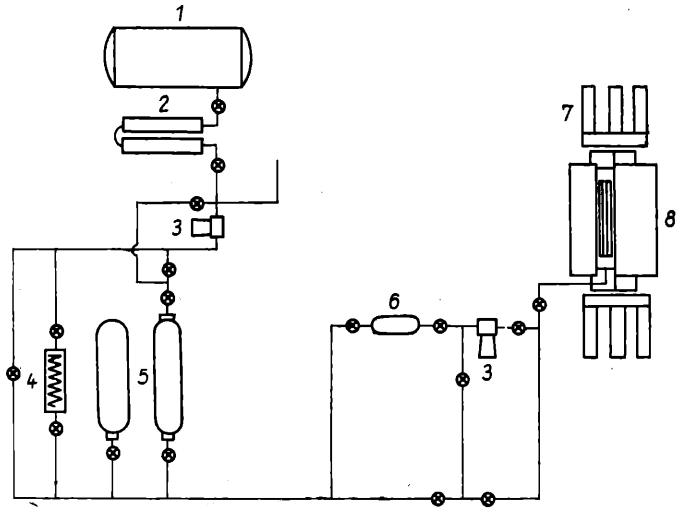


Bild 4.76. Schaltschema der Gasdruckanlage für eine Heißisostatik-Presse [228]

1 Behälter für Flüssiggas, *2* Verdampfer, *3* Kompressor, *4* Kühler, *5* Speicherflaschen, *6* Filter, *7* Rahmen, *8* Rezipient mit Ofen im Druckraum

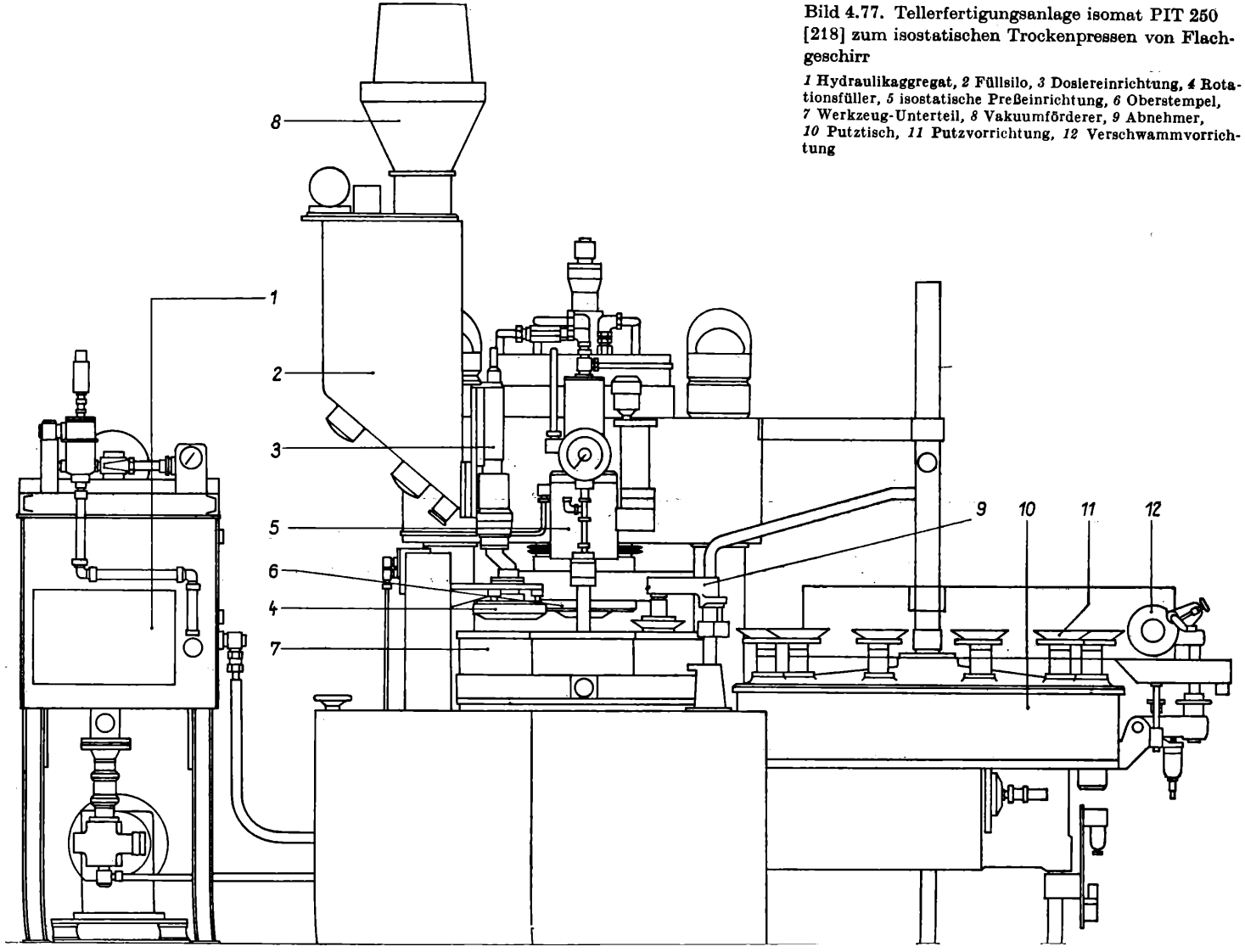


Bild 4.77. Tellerfertigungsanlage isomat PIT 250 [218] zum isostatischen Trockenpressen von Flachgeschirr

1 Hydraulikaggregat, *2* Füllsilo, *3* Dosiereinrichtung, *4* Rotationsfüller, *5* isostatische Preßeinrichtung, *6* Oberstempel, *7* Werkzeug-Unterteil, *8* Vakuumförderer, *9* Abnehmer, *10* Putztisch, *11* Putzvorrichtung, *12* Verschwammvorrichtung

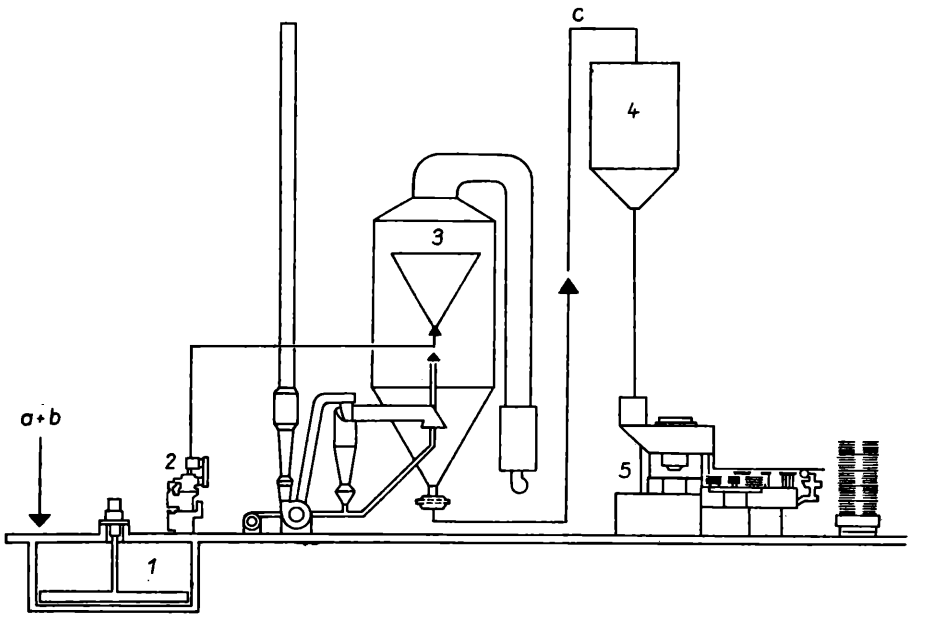


Bild 4.78. Schema einer Tellerfertigungslinie unter Einsatz einer isostatischen Presse vom Typ »isomat« [218]

1 Schlickervorratsbehälter, *2* Hochdruck-Förderpumpe, *3* Zerstäubungstrockner, *4* Granulatsilo, *5* Tellerfertigungsanlage PIT 250 oder PIT 500, *a* Schlicker, *b* Zusätze, *c* Granulat

Tabelle 4.22. Technische Daten von isostatischen Trockenpressen für Flachgeschirr vom Typ »isomat« [218]

	PIT 250	PIT 500
Pressenschließkraft, MN	2,5	5
praktisch erzielbare Leistung je nach Artikel, Stück/h	600	500
Tellerrohdurchmesser, max., mm	220	310
installierte elektrische Leistung, kW	23	30
Platzbedarf (etwa), m²	4,0 × 3,0	4,5 × 3,5
Maschinenhöhe (etwa), m	2,4	3,0
Druckluftverbrauch (etwa), l min^{-1}	20	50
Nettomasse (etwa), kg	10500	14000

terwerkzeuge rasch und unbehindert ausgewechselt werden. Bild 4.78 zeigt die Einordnung einer solchen isostatischen Tellerpresse vom Typ »isomat« in eine Fertigungslinie, Tabelle 4.22 gibt die technischen Daten an.

4.3.6.3. Hydraulische Flachgeschirrpresse mit isostatischer Verdichtung, Fig. 230.02

Die Presse der Firma Gebrüder Netzsch, Maschinenfabrik, Selb, ist zur Herstellung von rotations- und nichtrotationssymmetrischem Flachgeschirr, insbesondere von flachen und tiefen Tellern mit Relief und festoniertem Rand aus Sprühkornmassen geeignet [211]. Auf der Presse können gleichzeitig zwei verschiedene Artikel produziert werden. Die Leistung ist von der Form und Größe der Artikel abhängig und beträgt etwa 850 Stück/h.

Die Presse mit einer Preßkraft von 5,6 MN besitzt einen *vertikal* angeordneten Preßtisch, wodurch das System des sogenannten vorbestimmten Füllraums angewandt werden kann. Bei diesem System wird zwischen Ober- und Unterstempel das Granulat von oben eingefüllt. Bild 4.79 zeigt das Schema der Anlage als Draufsicht.

Am Pressentisch sind zwei hydraulische Preßzylinder angeordnet, die jeweils ein Werkzeug-

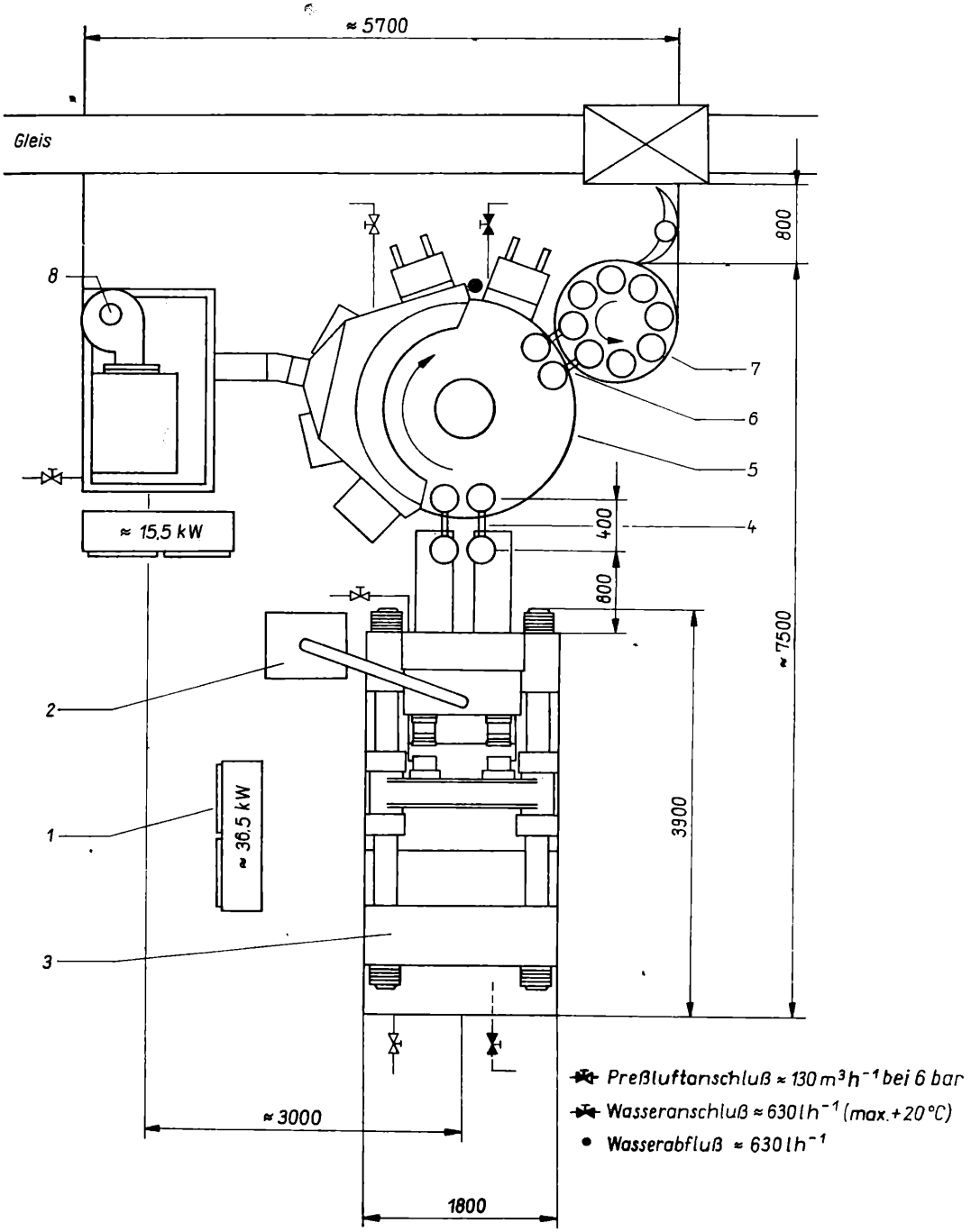


Bild 4.79. Flachgeschirr-Fertigungsanlage für isostatische Verpressung gemäß Fig. 230.02 [211]

1 Schaltschrank, *2* Granulatsilo, *3* isostatische Flachgeschirrpresse, *4* Umsetzvorrichtung, *5* Putzmaschine, *6* Umsetz-, Fußglätt- und Stapelvorrichtung, *7* Stapel-Drehtisch, *8* Entstaubungsanlage

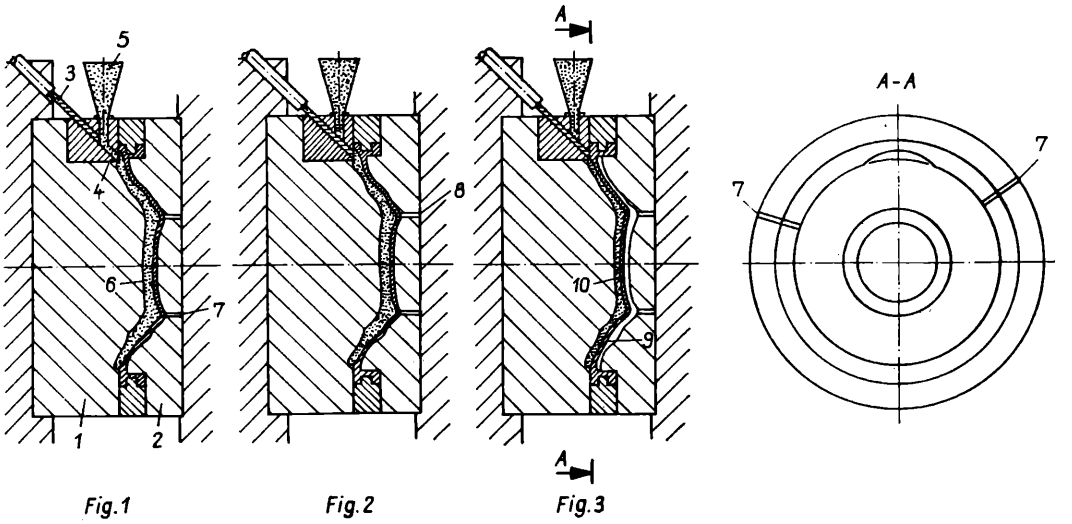


Fig.1 Fig.2 Fig.3

Bild 4.80. Prinzip des Einfüllens und isostatischen Pressens bei der Flachgeschirr-Fertigungsanlage gemäß Fig. 230.02 [211]

1 Werkzeugoberteil, *2* Formenunterteil, *3* Schieber, *4* Mündung, *5* Behälter, *6* Hohlraum, *7* Entlüftungskanäle, *8* Druckmittelkanäle, *9* Membran, *10* Formling

oberteil mit dem dazugehörigen Füllschiebersystem tragen. Am horizontal verschiebbaren Pressenstempel befinden sich die beiden Werkzeugunterteile mit den hydraulischen Einrichtungen für das isostatische Verdichten. Mittels Langhub-Schließzylinders und Verriegelungszylinders werden die Werkzeuge geschlossen.

Beim Schließen fahren die beiden Unterwerkzeuge (*2*) in die beiden Oberwerkzeuge (*1*) ein und bilden einen exakt vorgegebenen, einstellbaren Füllraum (Bild 4.80, Fig. 1). Sobald die Füllstellung erreicht ist, wird der Schieber (*3*) zurückgezogen, die Mündung (*4*) dadurch freigegeben und in einer kurzen Zeitspanne von etwa 1 s das Preßgranulat (Feuchtigkeit 1,5 bis 2,5 %) durch Druckluftbeaufschlagung des Behälters (*5*) in den Füllraum (*6*) eingeschlossen. Die zum Füllen eingesetzte Druckluft entweicht über in der Form angeordnete Entlüftungskanäle (*7*). Die Füllvorrichtung ist ohne Umstellung für alle Artikelgrößen (max. Artikelrohdurchmesser 276 mm) geeignet. Der Behälter (*5*) wird jeweils mit einem Vakuumfördergerät aus einem neben der Presse angeordneten Granulatsilo automatisch mit Masse gefüllt.

Ist der Füllvorgang beendet, wird die Mündung durch den Schieber wieder verschlossen (Bild 4.80, Fig. 2), und die isostatische Verdichtung beginnt. Dabei wird die Membran (*9*) durch ein flüssiges Druckmittel, das durch die Kanäle (*8*) eingeleitet wird, von der Form verdrängt (Bild 4.80, Fig. 3).

Der isostatische Preßdruck beträgt etwa 30 MPa und ist durch ein Druckminderventil je nach Tellerform und Preßmasse veränderbar. Nach Verdichtung der Preßmasse zu einem homogenen Formling (*10*) erfolgt der Druckabbau des Druckmittels. Dieser Druckabbau wird mittels Druckübersetzers und Proportionalventilen so gesteuert, daß durch den Entspannungsvorgang im Preßling keine Risse oder sonstigen Beschädigungen auftreten.

Der Ablauf des Druckabbaus ist auch von der verwendeten Preßmasse und der Form des Preßlings abhängig. Der Druckabbau erfolgt in drei Stufen. Während im Bereich von 30 bis 10 MPa der Druck schlagartig fällt, muß im Bereich bis etwa 1,0 MPa der Druck nach einer vorgegebenen Kurve abgebaut werden. Im letzten Bereich erfolgt gleichzeitig das Öffnen des Werkzeuges, wobei vor der Freigabe des Formlings die Membran mit Vakuum beaufschlagt wird. Die Zeit für den Druckabbau schwankt zwischen 0,6 bis max. 2 s.

Beim Öffnen der Presse werden die beiden Werkzeugunterteile von den Oberteilen getrennt. Die Formlinge bleiben dabei für einen kurzen Moment an den Oberwerkzeugen liegen. Nach der Expansion lösen sie sich selbständig und fallen im freien Fall auf eine Abnahmevorrichtung. Über diese Vorrichtung werden die Artikel nach außerhalb des Pressenraums transportiert.
Um ein schnelles Umstellen der Anlage auf andere Artikel zu gewährleisten, sind der Pressentisch und der Pressenstempel mit speziellen Werkzeugaufnahmen versehen. Diese Aufnahmen ermöglichen ein Wechseln der beiden Werkzeuge in etwa 15 bis 20 min. Ein Preßwerkzeug besteht aus einer Grundausstattung und aus einem Austauschsatz. Bei der Herstellung von Tellern mit gleichem Außendurchmesser muß nur der jeweilige Austauschsatz gewechselt werden. Zur Erleichterung des Werkzeugwechsels ist auf dem Pressengestell ein Ausleger mit Hebezeug angebracht. Die Presse wird mit einer Putzmaschine, einem Fußglättisch und Übertragungs- und Stapeleinrichtungen sinnvoll zu einer automatischen Fertigungsanlage komplettiert (Bild 4.79). Die technischen Daten enthält Tabelle 4.23.

Tabelle 4.23. Technische Daten der isostatischen Flachgeschirrpresse (gemäß Fig. 230.02) [211]

Preßkraft	5,6 MN
Leistung	etwa 850 Stück/h
Größe der gebrannten Artikel	17...25 cm
Rohdurchmesser der gepreßten Artikel, max.	276 mm
Anzahl der Werkzeuge	2
elektrische Leistung des hydraulischen Pumpenmotors	30 kW
elektrische Leistung des Vakuumpumpenmotors	0,55 kW
elektrische Leistung der Austragvorrichtung	0,25 kW
installierte elektrische Leistung	etwa 32 kW
erforderlicher Luftdruck	6 bar
Luftverbrauch bei maximaler Hubzahl	48 $m^3 h^{-1}$ (Ansaugluft)
Länge der Presse (etwa)	5200 mm
Breite der Presse (etwa)	1800 mm
Höhe der Presse (etwa)	3900 mm
Masse der Presse (etwa)	15000 kg

4.3.6.4. Isostatische Preßautomaten, Typ PI

Die Automaten dienen der Herstellung von Zündkerzenisolatoren, Mahlkugeln, Röhrchen, Filterkerzen und Schleifstiften. Die Firma Dorst – Maschinen- und Anlagenbau, Kochel am See, stellt zwei Grundtypen von Pressen mit 50 und 2000 kN Schließkraft her, auf denen vorwiegend in Mehrfachwerkzeugen Großserien gefertigt werden [218]. Bild 4.81 zeigt das Preßschema für die Herstellung von Mahlkugeln.
In Tabelle 4.24 sind die technischen Daten der Preßautomaten PI zusammengefaßt.

Tabelle 4.24. Technische Daten der isostatischen Preßautomaten PI [218]

	Typ PI					
	25/25	25 K	25 R	25 S	25 F	200 K
Hauptanwendungsgebiet	Zündkerzenisolatoren	Kugeln	Röhrchen, Stäbchen	Schleifstifte	Wasser- und Gasfilter	Kugeln
Abmessungen der Teile, max. Preßformate, mm	100 lang	55 ∅	200 lang	80 lang	145 lang	100 ∅
Matrizenschließkraft, max., MPa	175	260	250	250	280	2220
isostatischer Preßdruck, max. [bar]	60	60/160	100/200	50	50	60
Leistung, max., Hub/min	8	5	2...3	5...6	2	1...3

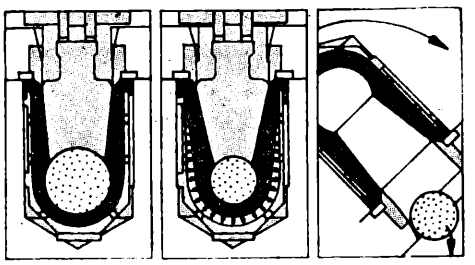


Bild 4.81. Preßschema zur Herstellung von Mahlkugeln [218]
a) Einfüllen des Granulats und Verschließen der Form
b) Isostatischer Druckaufbau mit Verdichtung des Granulats
c) Entleeren der Werkzeugform durch Schwenken

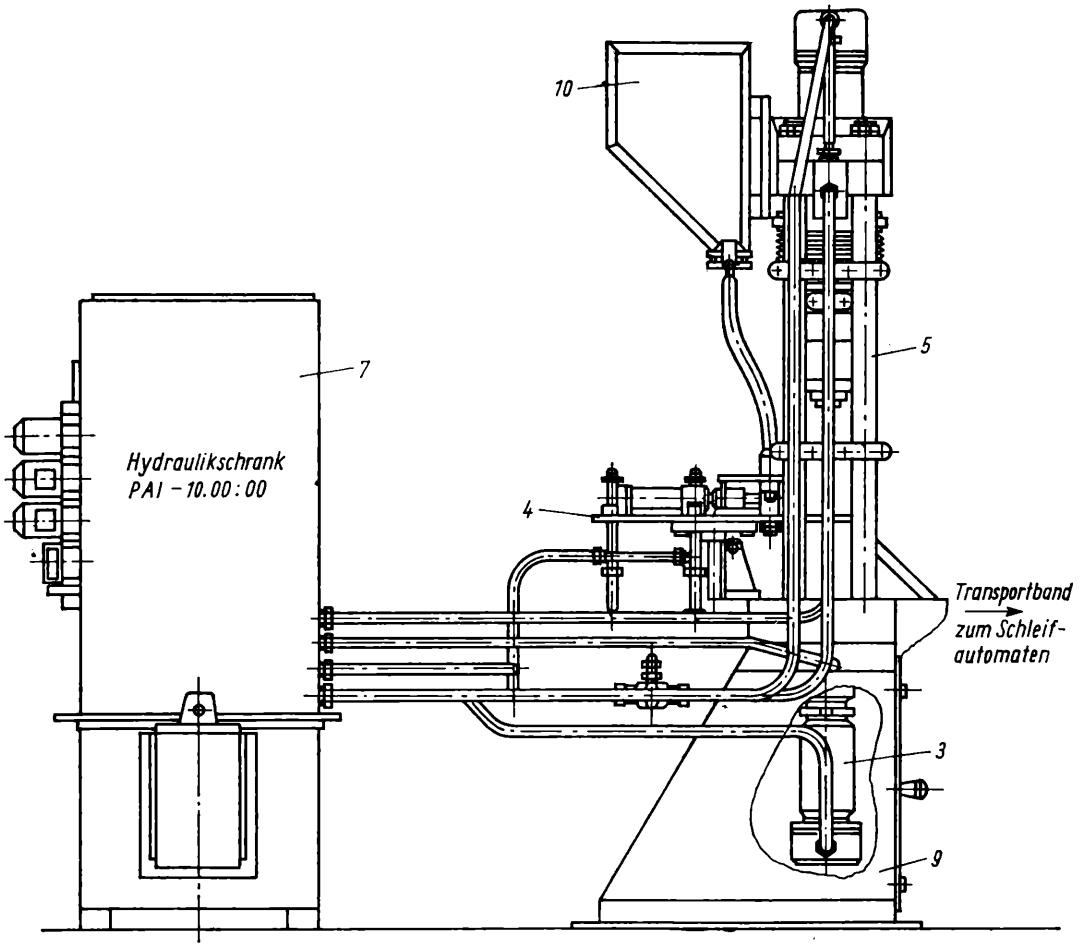
Nachfolgend wird die Maschine vom Typ PI 25/25, die zum Pressen von Isolierkörperrohlingen für Zündkerzen dient, beschrieben. Als Masse kommt hochtonerdehaltiges Sprühgranulat mit einer Feuchte von $<0{,}5\,\%$ und einer Schüttdichte von 100 bis 110 g dm^{-3} zum Einsatz.
Die in Bild 4.82 dargestellte Anlage besteht aus den Baugruppen

- Torgestell (*5*),
- Massevorratsbehälter (*10*),
- Füllschieber (*4*),
- 6fach-Werkzeug mit fixer Matrize (*1, 2, 11*),
- Druckübersetzer (*3*),
- Transportband,
- Hydraulikanlage (*7*) und
- elektrische Anlage (*8*).

Den Hauptteil der *Hydraulikanlage* stellt eine Radialkolbenpumpe mit zwei verstellbaren Förderströmen dar. Sie befindet sich im Hydraulikschrank (*7*), der separat vom Preßautomaten in einem lärmmindernden Raum untergebracht ist. Alle hydraulischen Verbindungen zum Preßautomaten sind starre Rohrleitungen, die eine Länge von etwa 3 m nicht überschreiten, da die Reibungsverluste sonst zu hoch wären.
Es werden drei Ölkreisläufe unterschieden:

- Steuerkreis,
- Arbeitskreis *I* und
- Arbeitskreis *II*.

Die Radialkolbenpumpe mit zwei unterschiedlichen Förderströmen von beispielsweise 100 und 20 l min^{-1} erzeugt im Arbeitskreis *I* einen Druck $p_{max} = 32$ MPa. Der erforderliche Preßdruck im Automaten entsteht im Arbeitskreis *II* durch einen Druckübersetzer (*3*) (1:4). Ein verstellbares Kontaktmanometer garantiert einen vorgegebenen Arbeitsdruck, der kurzzeitig auf- und abgebaut wird.
Da zwischen den beiden Arbeitskreisen keine hydraulische Verbindung besteht, können Verunreinigungen des Öls vom Preßwerkzeug nicht in den Ölkreislauf *I* eindringen. Der Ölkreislauf des Arbeitskreises *I* und des Steuerkreises gelangt in einen gemeinsamen Vorratsbehälter der Hydraulikanlage.
Der gesamte Arbeitsablauf wird durch eine *elektrohydraulische Folgesteuerung* geregelt, die über Endschalter und Relais ausgelöst wird. Um die hydraulischen Umsteuerschieber, die den Zu- und Ablauf des Ölstromes zum Druckaufbau und -abbau in Arbeitskreis *I* regeln, zu betätigen, erzeugt die an der Radialpumpe angebrachte Zahnradpumpe einen Steuerdruck von 3 MPa. Der Zulauf des Steueröls zur Betätigung der hydraulischen Umsteuerschieber im Arbeitskreis *II* wird über elektromagnetische Umsteuerschieber ausgelöst, die von den Endschaltern und Relais am Preßautomaten sowie vom Schaltpult aus elektrisch betätigt werden.
Ein Ölseparator, der sich außerhalb des Hydraulikschrankes befindet und im Ölkreislauf eingebaut ist, reinigt und kühlt ständig das Arbeitsmedium Öl.
Der *Arbeitszyklus* beginnt mit der Vorwärtsbewegung des Füllschiebers (*4*), s. Bilder 4.82a und b. In der vorderen Stellung verharrt der Schieber eine gewisse Zeit, die an einem Zeitrelais einstellbar ist. Die in der Praxis übliche Zeit liegt bei etwa 2 s. Währenddessen rieselt das im Schieber separat für jeden Isolierkörperrohling auf ein bestimmtes Volumen vordosierte Granulat in die Gummiform des Werkzeugunter-



a

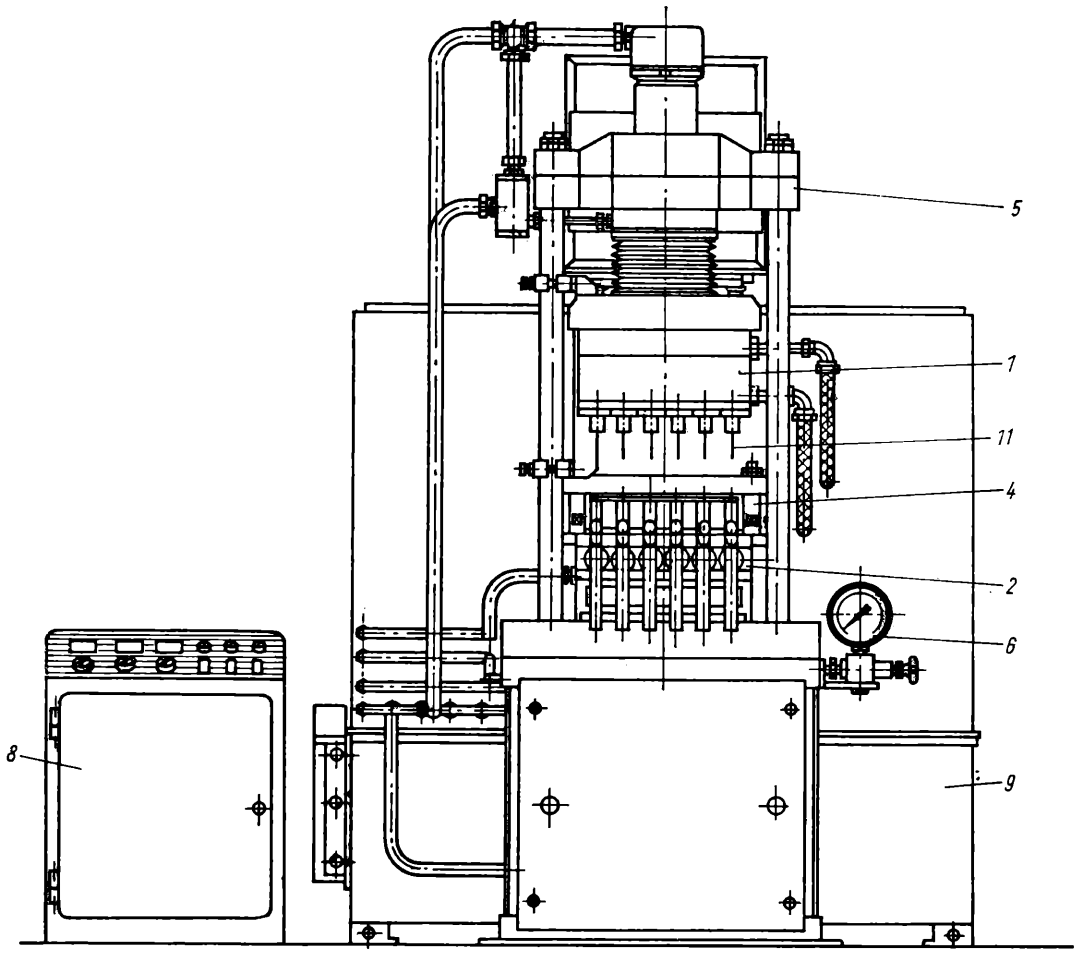
Bild 4.82. Isostatische Preßanlage für Zündkerzenisolierkörper [218]
a) Schema der Vorderansicht, *b*) Schema der Seitenansicht

1 Werkzeugoberteil, *2* Werkzeugunterteil, *3* Druckübersetzer 1 : 4, *4* Füllschieber, *5* Torgestell (Säulen und starre Traverse), *6* Kontrollmanometer, *7* Hydraulikschrank, *8* Elektroschrank, *9* Gestellunterteil, *10* Massevorratsbehälter, *11* Preßnadeln

teils (*2*) ein. Das Volumen der Vordosierung ist variierbar und kann verschiedenen Artikelgrößen angepaßt werden. Nach erfolgter Füllnug geht der Schieber mit den an der Vorderseite angebrachten Rutschen in die Ruhestellung zurück. Während der Stillstandszeit rieselt erneut Granulat aus dem Massevorratsbehälter (*10*) über Schläuche in die Kammern zur Vordosierung ein. Die Bewegung des Füllschiebers wird durch einen hydraulisch betätigten Arbeitszylinder erzeugt.

Das Erreichen der vorgeschriebenen Lagen aller Bewegungselemente wird durch Endschalter kontrolliert.

Im Anschluß an den Füllvorgang beginnt die Abwärtsbewegung des Oberstempels. Der »Leerweg« wird im sog. Eilgang mit hoher Geschwindigkeit durchfahren, wozu der größere der beiden möglichen Ölförderströme der Radialkolbenpumpe benötigt wird. Um einen harten Aufprall des Werkzeugoberteils (*1*) auf die Abdeckplatte des Werkzeugunterteils (*2*) zu verhindern, wird kurz vor Erreichen der Endstellung die Geschwindigkeit verringert. Der Zeitpunkt ist



b

durch einen verschiebbaren Endschalter festlegbar. Durch Betätigen dieses Schalters wird die Radialkolbenpumpe auf die niedrigere Fördermenge umgeschaltet und somit die Bewegung des Oberstempels langsam fortgesetzt. Die Preßnadeln (*11*), welche den Isolatorrohlingen die Innenkontur geben, fahren dabei in die gefüllten Gummiformen ein. Die Preßnadeln bestehen in der Regel aus durchgehärtetem Stahl. Durch die Stempel des Werkzeugoberteils werden die Öffnungen des Werkzeugunterteils dicht verschlossen. Die maximale Schließkraft beträgt beim PI 25/25 175 kN.

Die Gummiformen befinden sich unter der Abdeckplatte im Werkzeugunterteil. Sie werden aus ölfestem Spezialgummi gefertigt. Ihre Formgebung erfolgt durch Vulkanisieren. Gemessen am Aufwand zur Fertigung herkömmlicher Preßwerkzeuge, ist die Herstellung der Gummiformen extrem einfach. Die Kosten dafür sind unerheblich.

Nach dem Verschluß des Werkzeuges wird im Werkzeugunterteil der hydrostatische Öldruck aufgebaut. Der Druck im Arbeitskreis *I* wirkt mittels eines Druckübersetzers (*3*) mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:4 auf den separaten Arbeitskreis *II*. Der maximale Preßdruck liegt für den PI 25/25 bei 60 MPa. Die Abhängigkeit der Rohdichte vom isostatischen Preßdruck für eine Al_2O_3-Masse zeigt Bild 4.83.

Nach Erreichen der eingestellten Preßkraft und Ausführung der Pressung (Signal vom Kontakt-

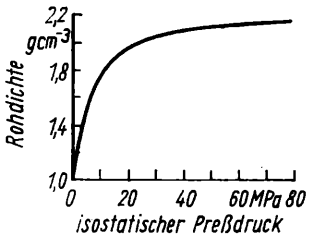


Bild 4.83. Abhängigkeit der Rohdichte vom isostatischen Preßdruck für eine granulierte Al_2O_3-Masse [240]

manometer) fällt der Druck schlagartig bis auf etwa 3 MPa ab. Der weitere Druckrückgang wird über eine Drossel gesteuert. Die Realisierung eines definierten Druckrückganges im unteren Druckbereich ist für den Formgebungsvorgang äußerst wichtig.

Die komplizierten Vorgänge sind hier nur vereinfacht dargestellt worden und stehen mit der Geometrie der Gummiform im Zusammenhang. Bild 4.84 zeigt den Schnitt durch eine Gummiform. Es ist deutlich erkennbar, daß die Wanddicke der Form von der Öffnung an stetig abnimmt. Diese Gestaltung garantiert, daß sich bei Einhaltung des beschriebenen Druckrückganges die komprimierte und an den Preßling gedrückte Gummiform zuerst im oberen Bereich und in horizontaler Ebene entspannt. Erst bei weiter fortschreitendem Druckabfall findet die vertikale Entspannung statt. Da durch die bereits erfolgte Rückdehnung des Gummis in horizontaler Ebene die Wandreibung zwischen Rohling und Form stark verringert ist, führt die Entspannung in vertikaler Richtung nicht zum sonst möglichen Abreißen des Isolatorrohlings. Kann dieser Ablauf z. B. durch falsche Gestaltung der Gummiform oder zu raschen Druckabfall nicht eingehalten werden, wird der Rohling zerstört.

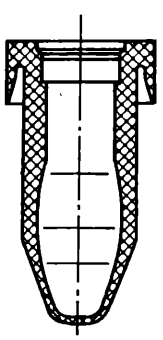


Bild 4.84. Schnitt durch eine Gummiform für Zündkerzen-Isolierkörperrohlinge

Nach völligem Druckrückgang erfolgt das Öffnen des Werkzeuges durch Anheben des Oberstempels. Die Isolatorrohlinge hängen an den Preßnadeln und werden mit der Aufwärtsbewegung des Werkzeugoberteils aus den Formen gehoben. Da infolge der elastischen Rückdehnung der Masse die Preßlinge nicht zuverlässig an den Nadeln haften, werden in die Preßnadeln Kerben eingearbeitet, um eine formschlüssige Verbindung von Nadel und Preßling zu erzielen. Durch anschließendes Hochziehen der Preßnadeln in das Werkzeugoberteil werden die Isolatorrohlinge abgestreift. Diese Bewegung erfolgt etwa synchron mit dem erneuten Betätigen des Füllschiebers. Die Rohlinge gleiten über die Rutschen des Schiebers auf ein Transportband. Die Anzahl der ausgehobenen Artikel wird registriert, um zu vermeiden, daß der nächste Preßzyklus auch dann beginnt, wenn z. B. ein Isolatorrohling in einer der Gummiformen verblieben ist. Diese Einrichtung erkennt allerdings nicht, ob der unzerstörte Preßling oder nur ein Teil desselben aus der Gummiform entfernt worden ist, und bietet somit keine absolute Sicherheit.

Ihre endgültige Form erhalten die Isolatorrohlinge durch einen sich unmittelbar an das Pressen anschließenden Schleifvorgang. Zum Einsatz kommen hierbei hochporöse Edelkorundscheiben oder feinporöse Rubinkorundscheiben. Die Umfangsgeschwindigkeit der Scheiben beträgt etwa 45 m s^{-1} [169].

4.4. Kopierdrehmaschinen

4.4.1. Automatische Isolatoren-Kopierdrehmaschine, Typ 542

Die automatische Isolatoren-Kopierdrehmaschine, Typ 542, der Fa. Gebrüder Netzsch Maschinenfabrik GmbH & Co., Selb, kopiert lederhart getrocknete Hubel, s. Abschnitt 3.4.1.2., zu Langstabisolatoren, Durchführungen, Freiluftnebelstützern sowie Sonderisolatoren mit konischen Körpern und unterschiedlichem Schirmprofil [211]. Bild 4.85 zeigt schematisch den

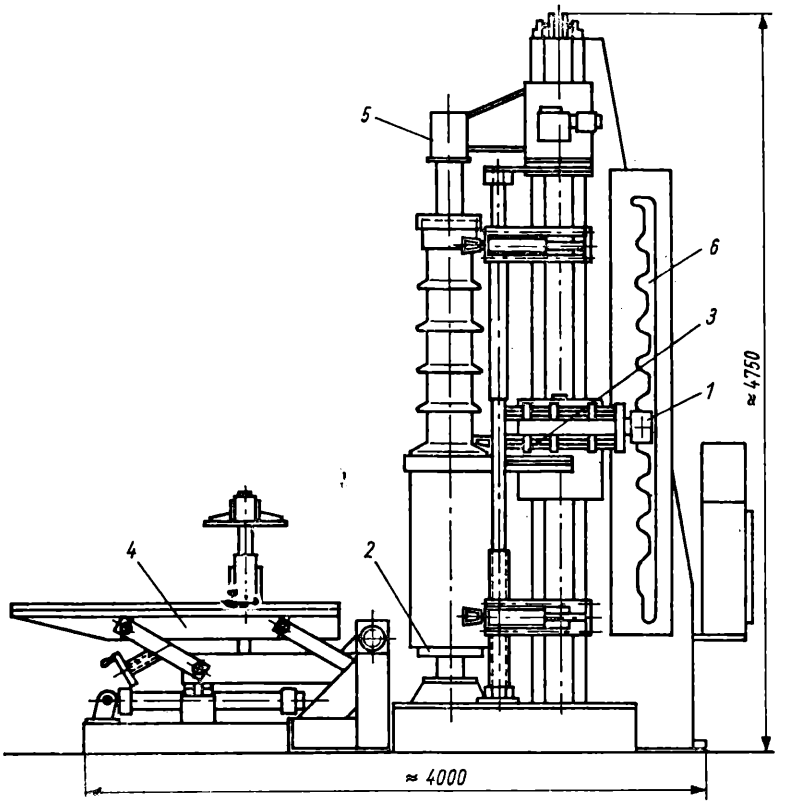


Bild 4.85. Prinzipieller Aufbau der Isolatoren-Kopierdrehmaschine 542 [211]

1 fotoelektrische Steuerung PH 18, *2* Drehscheibe, *3* Kopiervorrichtung, *4* Aufgabevorrichtung, *5* schwenkbarer Gegenhalter, *6* Zeichnungsvorlage

Tabelle 4.25. Technische Daten einiger Baugrößen der Isolatoren-Kopierdrehmaschine Typ 542

	Baugröße			
	11	16	21	26
Arbeitshöhe, max., mm	1000	3500	1000	3500
Durchmesser, max., mm	500	500	1000	1000
Durchmesser der Drehscheibe, mm	400	400	800	800
Drehzahl der Drehscheibe, min^{-1}	28...280	28...280	12...120	12...120
Vorschubgeschwindigkeit des Supports für das Kopieren, m min^{-1}	0,15 bis 0,80	0,15 bis 0,80	0,15 bis 0,80	0,15 bis 0,80
Leistung des Supportmotors, kW	0,2	0,2	0,2	0,2
Leistung des Drehspindelmotors, kW	1,8	1,8	3	3
Bohrdurchmesser, min., mm	120	120	150	150
Bohrdurchmesser, max., mm	320	320	400	400

Aufbau des Automaten, der in 12 Baugrößen gefertigt wird. In Tabelle 4.25 sind technische Daten einiger Baugrößen enthalten.

Der als Schweißkonstruktion ausgeführte Ständer besteht aus der Säule mit den Laufschienen. Die auswechselbare Drehscheibe (*2*) wird über einen Keilriemen von einem Elektromotor mit Regelgetriebe angetrieben. Die Drehscheibe selbst ist in zwei Rillenkugellagern geführt. Ein innerhalb der Drehscheibe angeordneter Hubzylinder setzt die Massehubel nach dem Aufgeben langsam auf der Scheibe ab. Die Drehzahl der Drehscheibe ist stufenlos regelbar. Ein auf dem Antriebsmotor befestigter Geber liefert das Signal für die Drehzahlanzeige. Beim Ausschalten der Drehscheibe fällt die Drehzahl kontinuierlich bis zum Stillstand. Der Antrieb der Scheibe kann erst nach Beendigung des Regelvorganges erneut eingeschaltet werden.

Die Drehscheiben aller Maschinengrößen haben einen freien Durchgang für den Anbau einer Innenbohr- und Kopiervorrichtung.

Durch die Tatsache, daß neben der Drehzahl des Isolators beim Außenkopieren auch der gegenläufige Bohrkopfantrieb sowie der Bohrkopfvorschub stufenlos regelbar sind, ergibt sich eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten. Man kann sich für jeden Isolatortyp die zweckmäßigste Spindel- und Bohrkopfdrehzahl mit dazu passendem Bohrkopfvorschub wählen.

Die Laufschienen für den Schlitten und den Gegenhalter (*5*) bestehen aus verschleißfestem Stahl. Sie sind mit der Säule verschraubt. Im Säulenhohlraum hängt das Ausgleichsgewicht. Es ist durch eine Zugkette mit dem Support verbunden. Die Kette wird an der Säule durch zwei Führungsrollen gelagert.

Der schwenkbare Gegenhalter (*5*) besteht aus dem pneumatisch betätigten Gegenhalterarm und der Zentriervorrichtung. Er wird auf den Laufschienen des Ständers durch Rollenlager geführt. Der Antrieb erfolgt über einen Drehfeldmagneten und Getriebe. Die Bewegung wird durch ein Ritzel auf eine Zahnstange übertragen.

Die auf den lederharten Hubel wirkende Haltekraft läßt sich innerhalb bestimmter Grenzwerte stufenlos regeln. Zur Einstellung dient ein Potentiometer. Der Gegenhalter gestattet es, daß ohne Umrüstarbeiten neben Vollsträngen auch Hohlstränge mittels Aufnahmedorns in der Maschine aufgenommen und bearbeitet werden können.

Das Kernstück der Maschine stellt die *Kopiervorrichtung* (*3*) dar. Die Funktionsweise zeigte bereits Bild 3.75. Sie besteht für die Kopierdrehmaschine 542 aus

- Vertikalschlitten,
- Fotoskop-Steuergerät und
- Horizontalsupport.

Horizontalsupport und Vertikalschlitten werden jeweils von einem stufenlos regelbaren Antrieb bewegt. Die Bewegungsübertragung mittels Ritzel und Zahnstange gewährleistet hohe Genauigkeit.

Der Vertikalschlitten wird in Längsrichtung durch die Laufschienen der Säule geführt. Auf dem Vertikalschlitten sitzt der Horizontalsupport. Er ist durch Kugelbuchsen leicht verschiebbar und spielfrei gelagert. Der Horizontalsupport trägt das Schnittwerkzeug, den Horizontalantrieb und das Fotoskop-Steuergerät. Die Form des Schnittwerkzeuges hängt vom Schirm des zu fertigenden Isolators ab.

Ein zweiter, kleinerer Support befindet sich unterhalb des Horizontalschlittens. Er dient zum Vordrehen des Hubels. Die Verbindung mit der Kopiereinrichtung wird über einen Elektrohubmagneten hergestellt. Bei Bedarf trennt eine Kupplung das Getriebe vom Supportantrieb. Mit Hilfe von Handrädern kann dann auch manuell kopiert werden.

Bestandteil des Automaten ist weiterhin eine Aufgabevorrichtung (*4*). Die Hubel werden auf ihr mit einer verstellbaren Spannklaue arretiert. Durch einen Abschneider erhält der Hubel eine plane Auflagefläche. Die Bewegung der Aufgabevorrichtung erfolgt durch einen hydraulischen Schwenkzylinder und ein drehbar gelagertes, verstellbares Auflageprisma. Zur Aufgabe wird die Vorrichtung mit dem festgespannten Hubel aus der Horizontalen in die Vertikale geschwenkt. Der Hubel wird anschließend vom Hubzylinder der Drehscheibe (*2*) und dem Gegenhalter (*5*) übernommen. Die Spannklaue öffnet sich, und die Aufnahmevorrichtung kehrt in die Ausgangsstellung zurück.

Ist der Kopiervorgang beendet, werden die lederharten Rohlinge durch eine auf verschiedene Isolatorabmaße einstellbare Entnahmevorrichtung übernommen und abgesetzt.

Die *fotoelektrische Steuerung* PH 18, s. Bild 4.85, Position (*1*), tastet mit zwei Lichtstrahlen die im Maßstab 1:1 hergestellte Schwarz/Weiß-Zeichnung (*6*) (s. a. Abschnitt 3.4.1.2.) ab. Fremde Lichtquellen beeinflussen den Abtastvorgang nicht. Von einem Fotowiderstandselement wird die von der Zeichnungsvorlage (*6*) reflektierte Lichtmenge aufgenommen und in ein elektrisches Signal umgewandelt. Nach hardwareseitiger Verarbeitung entsteht daraus je nach der Lage der abzutastenden Kontur zur Drehachse des Abtastkopfes und zur Fotowiderstandseinheit ein Korrektursignal. Das elektronisch verstärkte Signal wirkt über Steuermotor und Getriebe im Sinne einer Abweichungsminimierung auf den Abtastkopf. Dieser wird so lange nach rechts oder links gedreht, bis er wieder exakt über der Kontur steht.

Bedingt durch die Signallaufzeit, die Trägheit und das Spiel der Antriebselemente, wird das Korrektursignal bereits benötigt, bevor die Drehachse des Abtastkopfes an der Abtaststelle der Vorlagenkontur anlangt. Der Lichtfleck erhält daher einen von der Kopiergeschwindigkeit abhängigen Vorlauf. Synchron mit dem Abtastkopf dreht sich der sin/cos-Funktionsgeber für den Quer- und Längsantrieb der Kopiereinheit. Im Funktionsgeber wird vom Winkel φ der Bewegungsrichtung zu den Maschinenhauptachsen der sin und der cos gebildet. Wiederum hardwareseitig sorgt eine Spezialschaltung dafür, daß die Geschwindigkeiten für den Quer- und Längsantrieb der Kopiereinrichtung nach

$$\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1 \qquad (4.6)$$

geregelt werden. Die Kopiergeschwindigkeit bleibt so für alle Bewegungen innerhalb des Koordinatensystems konstant. Bild 4.86 verdeutlicht die Funktionsweise vom Koordinatenantrieb mit Fotoskop. Der Antrieb erfolgt getrennt für die Horizontal- und die Vertikalbewegung über Motore mit extrem kurzen Anlauf- und Bremszeiten.

Die Drehbewegung wird durch staubgeschützte und nachstellbare Präzisionsgetriebe über elektromagnetische Kupplungen auf Ritzel übertragen. Die Ritzel greifen in Zahnstangen ein und erzeugen die geradlinigen Bewegungen für den Schlitten und den Horizontalsupport.

Für die Qualität der Formgebung ist die Genauigkeit der *Zeichnungsvorlage* von entscheidender Bedeutung. Für die Anfertigung der Zeichnung soll daher hochwertiges, weißes, nicht reflektierendes Papier bzw. Plastfolie verwendet werden. Die Kontur des Isolators wird mit gut deckender, schwarzer Tusche mit 0,6 ± 0,2 mm Strichdicke im Maßstab 1:1 gezeichnet. Dabei ist die Form des Abdrehwerkzeuges zu berücksichtigen. Scharfe Ecken und 90°-Winkel müssen abgerundet werden. Verstärkt gezeichnete Linien führen zu einer Verlangsamung der Kopiergeschwindigkeit, s. Abschnitt 3.4.1.2.

Während des Kopiervorganges werden von den Fotozellen die Außenkanten der Tuschelinie abgetastet. Steuerlinie für den Abtaster ist die Mitte der gezeichneten Linie.

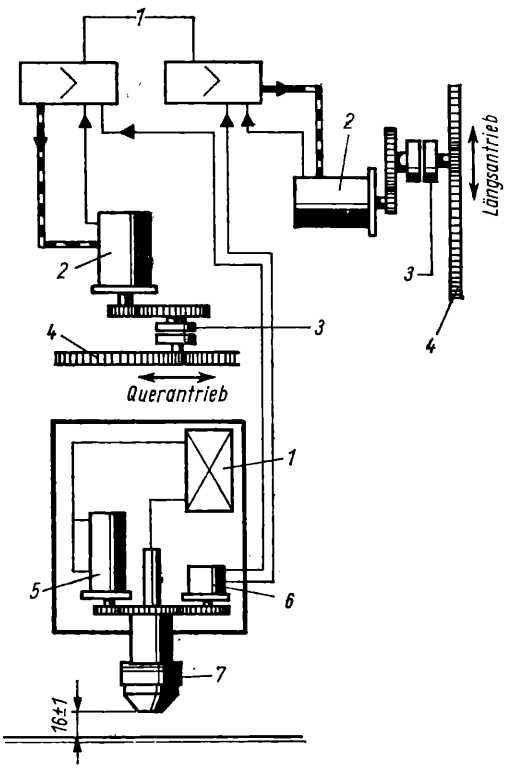


Bild 4.86. Koordinatenantrieb mit Fotoskop der Isolatoren-Kopierdrehmaschine 542 [211]

1 Verstärker, *2* Motor, *3* Kupplung, *4* Zahnstange, *5* Steuermotor, *6* sin/cos-Funktionsgeber, *7* fotoelektrischer Abtastkopf

4.4.2. Weißkopierdrehmaschine SO-1-NC

Die Weißkopierdrehmaschine SO-1-NC, die vom Forschungsinstitut für Elektrokeramik Hradec Králové [205] entwickelt wurde, wird zum Abdrehen isostatisch gepreßter Hubel im weißtrockenen Zustand eingesetzt. Bild 4.87 zeigt eine Ansicht der Anlage. Die Weiterentwicklung gegenüber herkömmlichen Anlagen besteht darin, daß die für die spanabhebende Bearbeitung von Metallen seit langem erprobte NC-Steuerung für das Abdrehen weißtrockener Hubel zur Anwendung kommt. Die Maschine wird vollautomatisch nach dem NC-System RS-409 A der Škoda-Werke Plzen gesteuert. Der Arbeitszyklus ist auf Magnetband gespeichert.
Ausgehend von der Erkenntnis,

- daß der Bearbeitungsvorgang zweckmäßigerweise in den Stufen Vorschruppen und Feinabdrehen abläuft [192] und
- daß die Geschwindigkeit des Weißabdrehens vergleichsweise niedrig liegt,

weist die Maschine drei Arbeitsstationen auf, und es erfolgt Mehrmaschinenbedienung. Die drei Stationen sind [192]:

- Vorbereitung
  Der Hubel wird eingehoben und gespannt sowie der bearbeitete Hubel ausgehoben und zum Gestell transportiert.
- Vorschruppen
  Der Hubel wird auf Grobmaße abgedreht.
- Abdrehen
  Der Hubel erhält die endgültigen Maße.

Durch Drehung der Gesamtauflage um jeweils 120° gelangt der Hubel an die betreffenden Arbeitspositionen. Die beiden Bearbeitungsstellungen sind mit Kreuzsupporten ausgerüstet, deren Bewegung in Richtung beider Koordinaten vom NC-System Škoda RS-409 A nach dem auf einem Magnetband aufgezeichneten Programm gesteuert wird.
Das Drehen des Hubels in der ersten Bearbeitungslage (Schruppen) erfolgt durch einen Hydraulikmotor mit konstanter Drehzahl. In dieser Lage werden 4/5 der Materialmenge abgedreht. Für das Drehen des Hubels in der zweiten Bearbeitungslage (Feindrehen) kommt ein Hydraulikmotor mit Servoventil zum Einsatz.

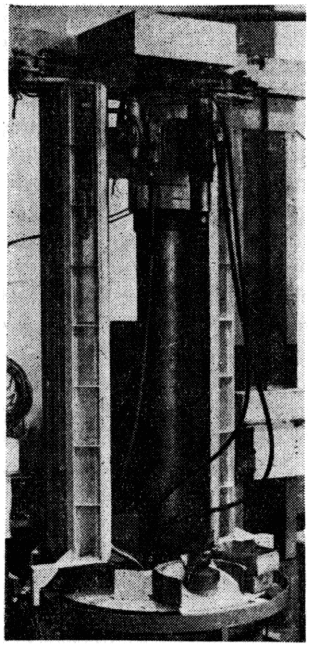


Bild 4.87. Weißkopierdrehmaschine SO-1-NC [206]

Durch eine Rückkopplung vom Sensor, der die Lage des Abdrehwerkzeugs aufnimmt, und in Abhängigkeit vom zu bearbeitenden Durchmesser werden vom Servoventil die Umdrehungen so geregelt, daß konstante Abdrehgeschwindigkeiten gewährleistet sind. In dieser Stellung wird so lange bearbeitet (etwa 1/5 des gesamten Materialabtrages), bis die endgültige Form erreicht ist. Die Rotation in der 3. Stellung erfolgt mittels Getriebemotors mit niedriger Drehzahl. In dieser Lage wird der unbearbeitete Hubel eingespannt und der fertige Formling entnommen.
Der Vorteil der Anlage besteht in den im Vergleich zur Lederhartbearbeitung höheren Bearbeitungsgenauigkeiten.
Der Hersteller gibt für minimale Supportgeschwindigkeit und maximale Schrittfrequenz Genauigkeiten $\leqq 1$ µm an [206]. Bedingt durch die fehlende Trocken- und die geringe Brennschwindung, erreicht man Erzeugnisse mit hoher Maßhaltigkeit. Die Oberflächenrauhigkeit entspricht den Anforderungen an das Erzeugnis.
Besonderer Sorgfalt bedarf die Behandlung des isostatisch gepreßten Hubels [169]. Die beson-

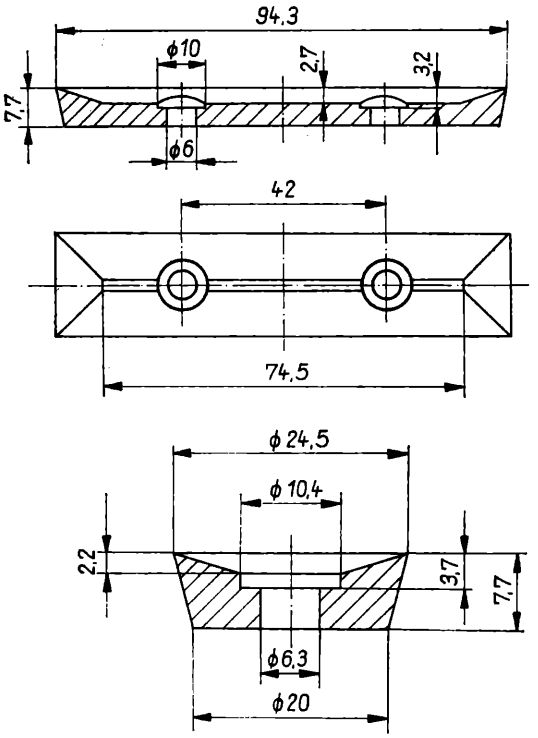


Bild 4.88. Vorschruppmeißel und Meißel für das Feinabdrehen (Rollenform) für Weißkopierdrehmaschinen [192]

dere Art der Halterung der Hubel in der Weißkopierdrehmaschine erfordert auf beiden Stirnseiten das Anbringen einer Kalotte. Das geschieht entweder direkt bei der isostatischen Hubelformgebung durch Einpressen oder durch Ausdrehen des geformten Hubels. Es hat sich als günstig erwiesen, die Hubel vor dem Weißabdrehen zwischen ein bis sieben Tage zu lagern. Bei der Lagerung ist der Hubel vor Feuchtigkeit jeder Art zu schützen. Eine lokale »Plastifizierung«, gefolgt von anschließendem Trocknen, birgt in jedem Fall die Gefahr der Rißbildung in sich.

Tabelle 4.26. Technische Daten des Weißkopierdrehautomaten SO-1-NC [206]

Maschinendaten	
Spannlänge des Hubels, max.	1800 mm
Spannlänge des Isolators, max.	1750 mm
Spannlänge des Isolators, min.	600 mm
Bearbeitungsdurchmesser, max.	325 mm
Bearbeitungsdurchmesser, min.	100 mm
Steuereinheit	
Zeitdauer der Bandspeicherung	120 min
Rückspulzeit des Bandes	3 min
Schrittfrequenz für die Steuerung,	500 Hz
kontinuierliche Regelung	1...200 Hz
(Konstante Schnittgeschwindigkeit im gesamten Drehbereich wird garantiert.)	
Zahl der gleichzeitig gesteuerten Achsen	4
Supportgeschwindigkeitsbereich	0,04...8,0 mm s^{-1}
Schnellvorschub	40 mm s^{-1}

Für das zweistufige Abdrehen (Vorschruppen und Feinabdrehen) kommen unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz.

Bild 4.88 zeigt die Werkzeugformen. Der oben dargestellte rechteckige Vorschruppmeißel dient der Grobbearbeitung, ein Rollenmeißel übernimmt die Endbearbeitung. Für beide Werkzeuge betragen Spanwinkel und Freiwinkel zweckmäßigerweise 15° [192]. Die Form des Vorschruppmeißels bewirkt eine große Spantiefe bei relativ hoher Schnittgeschwindigkeit. Schneidkeramik auf Al_2O_3-Basis hat sich als günstigster Werkzeugwerkstoff erwiesen [169]. Es wurden 50 bis 100 Isolatoren je Werkzeug abgedreht. Tabelle 4.26 enthält einige technische Daten des Weißkopierdrehautomaten SO-1-NC.

Literatur- und Quellenverzeichnis

[1] *Fischer, W.; Jarczak, K.; Küchler, H.* und *Storm, W.:* Technisch-ökonomische Analyse der feinkeramischen Formgebungstechnologie. Silikattechnik 24 (1973) 10, S. 329 bis 332

[2] *Haase, Th.:* Keramik. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1968

[3] *Hofmann, U.:* Die Tonminerale und die Plastizität des Tons. Keramische Z. 14 (1962) 11, S. 14 bis 19

[4] *Jasmund, K.:* Die silikatischen Tonmineralien. Weinheim: Verlag Chemie GmbH 1955

[5] *Hinz, W.:* Silikate. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1970

[6] *Kingery, W. D.:* Introduction to Ceramics. New York: John Wiley & Sons 1963

[7] *van Olphen, H.:* Clay Colloid Chemistry. New York: Verlag John Wiley & Sons 1963

[8] *Hennicke, J.* und *Hennicke, H. W.:* Formgebung in der Keramik, Teil II, Formgebung durch Abscheidung aus Schlickern im elektrischen Feld (Elektrophorese), Handbuch der Keramik. Freiburg i. Br.: Verlag Schmid GmbH 1981

[9] *Horn, J. M.* und *Onoda, G. Y.:* Surface Charge of Vitreous Silica and Silicate Glasses in Aqueous Elektrolyte Solution. J. Amer. Ceram. Soc. 61 (1978) S. 523 bis 526

[10] *Weyl Ormsby, W. C.:* Atomistic Approach to the Rheology of Sand-Water and of Clay-Water Mixtures. In: *F. R. Eirich* »Rheology«, Vol. 3, S. 249, Academic Press New York 1960

[11] *Krause, E.; Berger, I.; Plaul, Th.* und *Schulle, W.:* Technologie der Keramik, Bd. 2, Mechanische Prozesse. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1982

[12] *Sonntag, H.:* Lehrbuch der Kolloidwissenschaft. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1977

[13] *Hofmann, U.:* Oberflächenladung und Rheologie der Tonminerale. Ber. DKG 41 (1964), S. 680 bis 685

[14] *Norton, F. H.; Johnson, A. L.:* J. Amer. Ceram. Soc. 27 (1944), S. 77 bis 80; ref. in [5]

[15] *Wittaker, H.:* J. Amer. Cer. Soc. 22 (1939), S. 16 bis 23; ref. in [5]

[16] *Hofmann, U.:* Ber. DKG 26 (1949), 21; ref. in: Über die Ursachen der Verflüssigung des Kaolins. Ber. DKG 37 (1960) 6, S. 255 bis 264

[17] *Verwey, E. J.* und *Overbeek, J. Th. G.:* Theorie of stability of Lyophobic Colloids. Amsterdam: Elsevier Publ. Comp. 1948

[18] *Fusarini, E.:* Una recente teoria relativa allo scambio di ioni ed allo sviluppo di carica elettrica sulle particelle nei sistemi caolinete – acqua. Ceramica, Milano 13 (1958) 12, S. 61 bis 65

[19] *Krüger, H. G.:* Zur Theorie und technischen Nutzung elektrokinetischer Wirkprinzipien in der Keramik. Ilmenau: Technische Hochschule, Dissertation B, 1984

[20] *Fischer, W.* und *Fratzscher, K.-R.:* Leitfähigkeitsmessungen in keramischen Suspensionen. Silikattechnik 25 (1974) 6, S. 190 bis 192

[21] *Sonntag, H.* und *Strenge, K.:* Koagulation und Stabilität disperser Systeme. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1970

[22] *Pivinskij, J. E.* und *Romaschin, A. G.:* Quarzkeramik. Moskau: Verlag Metallurgija, 1974

[23] *Scharrer, E.:* Darmstadt: Dissertation 1955

[24] *Bakalov, Z.* und *Dadkova, T.:* Výzkum vlinu extraktu organických trislovin na vlastnosti licich porcelanovych hmot. Sklář a Keram., Praha 19 (1969) 10, S. 272/273

[25] *Kvjatkovskaja, K. K.* und *Oernov, V. A.:* Priroda raszizenija glin elektrolitami (Verflüssigung der Tone durch Elektrolyte). Steklo i keramika, Moskva 18 (1961) 2, S. 29 bis 33

[26] *Schulze, H. J.* und *Kästner, F.:* Wie sind die Begriffe Viskosität, Bildsamkeit, Plastizität und Bindefähigkeit auseinanderzuhalten? Tonind. Ztg. 89 (1965) 17/18, S. 395 bis 400

[27] *Hofmann, U.:* Neue Ergebnisse über die Silikate mit Schichtstruktur. Silikattechnik 8 (1957), S. 224 bis 230

[28] *Barker, G. J.* und *Trong, E.:* Method of determing the pH of ball clays. Bull. Amer. Ceram. Soc. 21 (1942), S. 263

[29] *Barker, G. J.* und *Trong, E.:* Improvement of stiff and clays through *p*H control. J. Amer. Cer. Soc. 21 (1938), S. 324; Factors involved in improvement of clays through *p*H control. Ibid 22 (1939), S. 308

[30] *Norton, F. H.:* Refractories (Feuerfeste Baustoffe), 3. Aufl. New York / Toronto / London: Mc Graw-Hill Book Comp. 1949

[31] *Haase, Th.:* Untersuchungen zur Bildsamkeit keramischer Massen. Silikattechnik 5 (1954) 10, S. 429 bis 432

[32] *Schwartz, B.:* Fundamental study of clay. XII. A note on the effect of the surface tension of water on the plasticity of clay. J. Amer. Cer. Soc. 41 (1952) S. 35

[33] *Singer, F. U.* und *Singer, S. S.:* Industrielle Keramik. Berlin / Göttingen / Heidelberg / New York: Springer Verlag 1964

[34] *Burgess, D. G.:* The Use of Lignin in Ceramic Processes. Am. Cer. Soc. Bull. 36 (1957) 5, S. 168 bis 171

[35] *Baudran, A.:* Die Plastizität und ihre Bedeutung für die keramische Industrie. Ber. DKG 40 (1963) 12, S. 625 bis 634

[36] *Moore, F.:* Institute of Ceramic textbook Series. 2. Rheology of ceramic systems. London: Maclaren and Sons LTO 1965

[37] *Hofmann, U.:* Die Grundlagen der trockengepreßten Massen und die Ursachen der Raumausfüllung der trockenen Masse. Ber. DKG 39 (1962) 2, S. 125 bis 130

[38] *Haase, Th.:* Vorgänge beim Trockenpressen. Ber. DKG 37 (1960) 3, S. 97 bis 101

[39] *Jessberger, H. L.:* Die Flüssigkeitsaufnahme von Tonen und die Bildsamkeit und Sedimentationsstabilität von Ton-Wasser-Gemischen. München: Techn. Hochschule, Diss. 1960; Auszug veröffentl. in: Bautechnik 38 (1961) 9, S. 299 bis 305

[40] *Jessberger, H. L.:* Die viskosen und thixotropen Eigenschaften von Ton-Wasser-Gemischen Teil 1—3. VDI-Z. 105 (1963), S. 8 bis 18, 59 bis 66, 187 bis 194

[41] *Teuchert, K.* und *Hahn, Ch.:* Rotationsviskosimetrische Untersuchungen an wäßrigen Kaolinsuspensionen mit dem Ziel einer Automatisierung rheologischer Messungen. Berichte DKG 52 (1975) 8, S. 277/272

[42] *Teuchert, K.:* Keramische Gießschlicker. Keram. Z. 31 (1979) 2, S. 80 bis 82

[43] *Peterfi:* Arch. Entwicklungsmechan. Org. 112 (1927), S. 660; ref. bei *Jessberger, H. L.:* Die viskosen und thixotropen Eigenschaften von Ton-Wasser-Gemischen. VDI-Z. 105 (1963) 1, S. 8 bis 13

[44] *Brückner, R.:* Zum Fließverhalten im System Kaolin-Wasser. Ber. DKG 46 (1969) 9, S. 469 bis 474

[45] *Kunz, W.:* Theorie der Verflüssigung. Keram. Z. 28 (1976) 7, S. 341 bis 345

[46] *Green, H. L.:* Industrial rheology and rheology structures. New York: John Wiley & Sons. 1949

[47] *Lück, W.:* Feuchtigkeit. München / Wien: Verlag R. Oldenburg

[48] Fragekasten, Keramik, Frage 403, 4. Antwort. Sprechsaal 105 (1972) 6, F 85 bis 87

[49] Fragekasten, Keramik, Frage 403, 1. Antwort. Sprechsaal 105 (1972) 6, F 22/23

[50] *Reumann, O.:* Die Verflüssigung von Kaolinen und Tonen sowie keramischen Massen und die Aufbereitung einer arbeitsfähigen Gießmasse. Glas-Email-Keramo-Technik 19 (1968) 1, S. 1 bis 6 und 2, S. 45 bis 50

[51] *Pačl, J.* und *Blaha, M.:* Řizeni thixotropie licich porcelanovych hmot a vliv zivcu na jejich vlastnosti. Sklář a Keram. 17 (1967) 4, S. 106 bis 108

[52] VEB Prüfgerätewerk Medingen im Kombinat Medizin- und Labortechnik. Gebrauchsanleitung Rheotest.

[53] *Rieke, R.* und *Gieth, J.:* Ber. DKG 12 (1931) 569ff. ref. bei: *Hinz, W.:* Silikate. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1970

[54] *Enslin, O.:* Über einen Apparat zur Messung der Flüssigkeitsaufnahme von quellbaren und porösen Stoffen und zur Charakterisierung der Benetzbarkeit. Chem. Fabrik 6 (1933), S. 147/148

[55] *Panz, F.:* Der Enslinwert und seine Bedeutung zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit feinkeramischer Rohstoffe und Massen. Silikattechnik 21 (1970) 8, S. 265 bis 269

[56] *Entreß, K.:* Bestimmung des Anmachwassers nach Pfefferkorn und die Eignung des Verfahrens für die Betriebskontrolle. Silikattechnik 10 (1959) 9, S. 441/442

[57] *Astbury, N. F.:* Die Wissenschaft in der keramischen Industrie. Silikattechnik 12 (1961) S. 166 bis 175

[58] *Matejka, J.:* (Betriebliche Ausnutzung der Meßergebnisse mit dem Plastometer der Firma Netzsch) Übers. aus: Sklář a keram. 19 (1968) 8, S. 202 bis 207; Meißen: VE WTK

[59] *Matejka, J.:* (Graphische Auswertung der Messungen mit dem Plastometer Netzsch) Übers. aus: Sklář a keram. 22 (1972) 7, S. 222 bis 224; Meißen: VE WTK

[60] *Wiedenbeck, G.* und *Burkhardt, Ch.:* Einsatz des Penetrometers in der keramischen Industrie. Silikattechnik 25 (1974) 8, S. 280

[61] Plastizitäts- und Feuchtemeß- und -regelsystem. Hoi-Tronic. Ber. DKG 52 (1975) 4, S. 95/96

[62] *Hennicke, H. W.:* Zum Einsatz kleiner Datenverarbeitungsanlagen in Forschung und Betrieb. Keramische Zeitschrift 36 (1984) 10, S. 529 bis 533

[63] *Hennicke, H. W.:* Altes und Neues zum Problem der Bildsamkeit – Versuch eines Gespräches zwischen Theorie und Praxis. Weiden: Tagung der Bezirksgruppe Bayern der DKG am 1. 12. 1967

[64] *Bennett, I. G.:* Broken Coal. Journal of the Institute of Fuel 10 (1936), S. 22 bis 39

[65] *Erdmannsdörfer, O.:* Grundlagen der Petrographie. Stuttgart: Enke-Verlag 1924

[66] *Haage, R.:* Zur Klärung der Begriffe Struktur und Textur für den Bereich der Keramik. Silikattechnik 26 (1975) 6, S. 200/201

[67] *Vycudilik, P.:* Řizeni tvorbu střepu licich hmot (Regelung der Scherbenbildung bei den Gießmassen). Spěšná informace VUJK Karlovy Vary-Březová (1973) 2, S. 1 bis 9

[68] *Vycudilik, P.:* Vytvářeci vlastnosti licich suspenzi v jemné keramice (Formgebungseigen-

schaften der Gießmassen in der Feinkeramik). Sklář a keram. 24 (1974) 6, S. 163 bis 174

[69] *Braune, H.* und *Richter, J.*: Zur Thixotropie von Bentonitsuspensionen. Kolloid.-Z. 113 (1949), S. 20 bis 29

[70] *Peter, S.*: Über die Thixotropie von Graphitsuspensionen. Kolloid.-Z. 113 (1949), S. 29 bis 37

[71] *Vycudilik, P.* und *Jedlicka, P.*: Parameter, die die Formgebung und die nachfolgende Bearbeitung keramischer Suspensionen und plastischer Massen beeinflussen. Sammelband XVIII. Porzellankonferenz, Karlovy Vary (1974), S. 21 bis 30

[72] *Deeg, E.*: Die Scherbenbildung beim Schlickergießprozeß als Diffusionsproblem. Ber. DKG 30 (1953) 6, S. 129 bis 138

[73] *Dietzel, A.* und *Mostetzky, R.*: Vorgänge beim Wasserentzug aus einem keramischen Schlicker durch die Gipsformen. Ber. DKG 33 (1956), S. 7 bis 18, 47 bis 52, 73 bis 85, 115 bis 118

[74] *Mostetzky, H.*: Formgebung in der Keramik – eine Einführung in die theoretischen Grundlagen, aus: Handbuch der Keramik. Freiburg i. Br.: Verlag Schmid GmbH 1978

[75] *Adcock, D. S.* und *McDowell, I. C.*: The mechanism of filter pressing and slip casting. J. Amer. Ceram. Soc. 40 (1957) 10, S. 355 bis 360

[76] *Kozeny, J.*: Über kapillare Leitung des Wassers im Boden (Aufstieg, Versickerung und Anwendung auf die Bewässerung). Sitzber. Akad. Wiss. Wien, Math.-naturw. Kl. 136, Abt. IIa 1927, S. 271 bis 306

[77] *Carmen, P. C.*: Fluid Flow Through Granular Beds. Trans. Inst. Chem. Engrs. London 15 (1937), S. 155 bis 158

[78] *Carrie, J. P.*: La filtration des liquides. Bull. Soc. Franç. Ceram. (1979) 87, S. 3 bis 21

[79] *Jacobs, J. C. H.* und *Berden, W. J. H.*: Das Porengefüge im Gips. Ber. DKG 48 (1971) 10, S. 468/469

[80] *Lehmann, L.*: Gipsformen und der Einfluß ihrer Eigenschaften auf die Scherbenbildung beim Schlickergießen. Ber. DKG 35 (1958) 9, S. 273 bis 312

[81] *Lehmann, L.* und *Mostetzky, H.*: Zur Kennzeichnung der Saugfähigkeit von Gipsformen. Ber. DKG 38 (1961), S. 567 bis 569

[82] *Johnsen, A. L.* und *Norton, F. H.*: Fundamental Study of Clay. III. Casting as a base exchange phenomenon. J. Amer. Ceram. Soc. 25 (1942), S. 336 bis 344

[83] *Harkort, D.* und *Hofmann, U.*: Korrosion von Gipsoberflächen beim keramischen Schlickerguß. Ber. DKG 48 (1971) 11, S. 479 bis 483

[84] *Krüger, H. G.* und *Hülsenberg, D.*: Keramische Scherbenbildung. Weimar: 9. Internationale Baustoff- und Silikattagung 1985

[85] *Harkort, H. J.*: Neuere Verflüssigungsmittel für Steingutmassen in ihrem Einfluß auf Gießverhalten und Masseeigenschaften. Ber. DKG 42 (1965) 11, S. 423 bis 427

[86] *Bardin, C.*: Un defloculant actif: Le CNA P11. Ind. Ceram., Paris (1965) 570, S. 56a / 56b

[87] *Bakalov, Z.* und *Dadkova, T.*: Výzkum vlivu extraktu organických trislovin na vlastnosti licich porcelánových hmot. Sklář a keram. 19 (1969) 10, S. 272/273

[88] *Huber, P.* und *Kiele, U.*: Melflux – ein Verflüssigungsmittel für keramische Massen. Keram. Z. 32 (1981), S. 207

[89] *Höpfner, P.*: Celluloseäther in keramischen Schlickern und Massen. Berichte DKG 58 (1981) 4/5, S. 317 vis 321

[90] *Mulroy, D.*: Casting and the mechanics of the casting process. Ceramics. London 83 (1972) 285, S. 14/15, 17 bis 19, 21

[91] VEB Henneberg-Porzellan Ilmenau: Werksunterlagen

[92] Autorenkollektiv: Technologie der Feinkeramik. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1976

[93] *Harkot, D.* und *Hermann, R.*: Untersuchungen an feinkeramischen Gießmassen. Ber. DKG 33 (1956) 1, S. 18 bis 24

[94] *Brückner, R.*: Entstehung und Ursache von Inhomogenitäten beim Schlickergießprozeß und in keramischen Massen. Tonind.-Ztg. 91 (1967) 10, S. 401 bis 404

[95] *Brückner, R.* und *Dietzel, A.* Orientierungserscheinungen als Ursache von Inhomogenitäten in Gießschlickern und gegossenen Scherben Ber. DKG 44 (1967) 12, S. 592 bis 599

[96] *Salmang, H.*: Die Bedeutung der Oberflächenspannung für das keramische Gießverfahren. Ber. DKG 33 (1956), S. 65 bis 72

[97] *Karsch, K. H.*: Entmischungserscheinungen bei Stapelguß. Ber. DKG 47 (1970) 10, S. 714/715

[98] *Jordan, H.*: Entmischungserscheinungen beim Gießen von feinkeramischen Schlickern. Tonind.-Ztg. 94 (1970) 9, S. 371 bis 373

[99] *Olsevsky, G. N.*: Gießen von Sanitärsteingut unter Vakuum. Steklo i Keramika 16 (1959) 7, S. 15 bis 17

[100] *Adami, A.* und *Williams, L. S.*: Vakuumassisted Slip Casting. Amer. Ceram. Bull. 42 (1963) 7, S. 391 bis 393

[101] *Szymanski, J. M.*: Untersuchung der scherbenbildenden Eigenschaften von Gipsformen bei herabgesetztem Außendruck. Szklo i Ceramika. Warszawa 29 (1978) 2, S. 43 bis 47

[102] *Gulevic, O.:* Beschleunigung der Scherbenbildung beim Gießen keramischer Erzeugnisse. Sklář a keramik 12 (1962) 3, S. 77 bis 79

[103] *Baudran, A.; Erguerrand, M.* und *Risse, M.:* Beschleunigung der Scherbenbildung von sanitär-keramischen Schlickern. Ind. Ceram. (1970) 632, S. 653 bis 658

[104] *Mostetzky, H.; Olgun, C.* und *Ring, W.:* Untersuchungen über den Einsatz des Schlickerdruckgußverfahrens in der Porzellanindustrie. Berichte DKG 47 (1970) 2, S. 105 bis 110

[105] *Touzeau, M.:* Besuch einer Anlage der Fa. Dorst-Laufen zum Druckgießen von Sanitärkeramikteilen. Ind. Ceram. (1983) 772, S. 334 bis 337

[106] *Grünewald, H.* und *Karsch, K. H.:* Die Scherbenbildung keramischer Schlicker beim Druckgießen bis 40 atü. Keram. Z. 25 (1973) 11, S. 597 bis 600

[107] *Schwerin, B.* und *Illig, H.:* DRP 253429

[108] *Kainarski, I. S.* und *Malinowski, K. B.:* Electrophoretic as a method for casting of fine ceramic ware. Glass & Ceramics 15 (1958) 8, S. 194 bis 199 (Orig. russ.)

[109] *Entelis, F. S.* u. a.: Elektrophoretische Formgebung von Porzellanerzeugnissen. Übersetzung aus: Steklo i Keramika (1979) 11, S. 19 bis 21

[110] *Ryan, W.* und *Massoud, E.:* Electrophoretic deposition could speed up ceramic casting. Intercer. 28 (1979) 2, S. 117 bis 119

[111] *Andrews, J. M.:* Forming of ceramic bodies by electrophoretic deposition. Proc. Brit. Ceram. Soc. 12 (1969), S. 211 ff.

[112] *Singh, S. P.:* Forming of alumina ceramic by electrophoretic deposition and by melting and spraying. Leeds: Dissertation, 1972

[113] *El-Jazairi, B.* u. a.: On electrophoretic deposition of alumina from non-aqueous suspension. Sci of Ceramics 9 (1977), S. 46 bis 53

[114] *Lucek, J. W.:* Verfahren zur Herstellung von feuerfesten oder metallischen Formkörpern hoher Dichte durch elektrophoretisches Gießen. Offenlegungsschrift BRD B 28 B 1/26 DE 32 34 054

[115] *Hallmann, E.:* Die Berechnung der Schneckenpressen für Stoffe aus festen Partikeln. Ziegelindustrie 13 (1960), S. 321 bis 330

[116] *Chronberg, M. S.:* Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines plattenförmigen, aus agglomerierten Teilchen bestehenden Materials sowie so erhaltene Produkte, insbesondere keramische Produkte. Offenlegungsschrift BRD C 25 D 1/14 05 26 17 998

[117] *Chronberg, M. S.* und *Händle, F.:* Process and Equipment for the Production of Materials by Elektrophoresis Elephand. Interceram., Freiburg/Br. 27 (1978) 1, S. 33/34

[118] *Bartholome, F.:* Untersuchungen zur Anwendung der Elektrophorese in der keramischen Formgebung. Ilmenau: Technische Hochschule Dissertation, 1981

[119] *Hülsenberg, D.; Krüger, H. G.; Gernlein, W.* und *Knye, U.:* Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines keramischen Masseblattes WP C 25 D/24 26 637

[120] *William, I. C.:* Doctor-blade Process. Treatise on Material Science and Technology, vol. 9. New York, San Francisco, London 1976, S. 173 bis 198

[121] *Spauszus, S.* und *Palzer, U.:* Baukeramikplatten nach dem Bandgießverfahren, Vortrag 9. Internationale Baustoff- und Silikattagung, Weimar 1985

[122] *Vycudilik, P.* und *Jedlicka, P.:* Parametry ovlivnujici vytrarebi a nasledul zpracovani keramickych suspenzi a plastickych hmot (Parameter, die die Formgebung und die nachfolgende Bearbeitung keramischer Suspensionen und plastischer Massen beeinflussen). Sammelband XVIII. Porzellankonferenz, Karlovy Vary (1974), S. 21 bis 30

[123] *Haase, Th.* und *Petermann, K.:* Die Abhängigkeit der Viskosität bildsamer keramischer Massen von der Deformationsgeschwindigkeit. Silikattechnik 6 (1955) 10, S. 427 bis 430

[124] *Nelson, J. A.* und *Andrews, A. J.:* Rheological properties of the clay-watersystems under pressure. Amer. Ceram. Soc. Bull. 38 (1959), S. 447 bis 455

[125] *Nützenadel, P.:* Zum Fließverhalten plastischer Massen. Silikattechnik 21 (1970) 3, S. 86 bis 89

[126] *Schlegel, D.:* Untersuchungen zum Fließverhalten plastischer keramischer Massen. Ber. DKG (1970) 12, S. 774 bis 779

[127] *Nützenadel, P.:* Zum Fließverhalten plastischer keramischer Massen bei verschiedenen Deformationsgeschwindigkeiten. Dissertation, Bergakademie Freiberg 1965

[128] *Pels Leusden, C. O.:* Zusammenhänge zwischen rheologischen Eigenschaften plastischer keramischer Stoffe und technische Daten bei ihrer Verformung. Ber. DKG 44 (1967) 10, S. 506 bis 512

[129] *Hülsenberg, D.* und *Krüger, H. G.:* Beitrag zum rheologischen Verhalten verflüssigungsmittelhaltiger Drehmassen. Dresden: Vortrag anläßlich der 8. Fachtagung Feinkeramik, 1978

[130] *Krüger, H. G.* und *Körner, R.:* Einfluß von Gipsverunreinigungen auf die keramische

Formgebung im VEB Henneberg-Porzellan. Silikattechnik 29 (1978) 6, S. 175 bis 177

[131] *Heugel, W.:* Mauerziegel, Leichtziegel, Klinker, Steinzeugröhren, Blähton – hergestellt im Strangformverfahren mit Schneckenpressen oder Vakuumaggregaten. Silikat-Journal 15 (1976) 1, S. 10 bis 16

[132] *Krause, E.; Plaul, Th.; Müller, R.* und *Köhler, Ch.:* Grobkeramiktaschenbuch, Band 2, Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1975

[133] *Tränkner, G.:* Taschenbuch Maschinenbau, Bd. 3/III; Arbeitsmaschinen, 2. Aufl. Berlin: VEB Verlag Technik 1979

[134] *Plaul, Th.:* Die Entlüftbarkeit bildsamer keramischer Massen. Baustoffindustrie 14 (1971) 12, S. 427 bis 430

[135] *Hallmann, E.:* Strangpressenberechnung für keramische Stoffe. Sprechsaal 116 (1983) 1, S. 25 bis 27; 8, S. 653 bis 662; 10, S. 895 bis 898; 12, S. 1075 bis 1077

[136] *Pels Leusden, C. O.:* Über die Betriebsweise der Arbeitszone einer Schneckenpresse bei der Förderung einiger grobkeramischer Rohstoffe. Dissertation TH München 1965

[137] *Pels Leusden, C. O.:* Die Formgebung auf Strangpressen. Wiesbaden-Berlin (West): Bauverlag GmbH 1975, Ziegeleitechnisches Jahrbuch 1975, S. 239 bis 380

[138] *Pels Leusden, C. O.:* Formgebung auf Schnekkenpressen, Teil 2, Die Herstellung einwandfreier Stränge. Keram. Z. 30 (1978) 2, S. 93 bis 96

[139] *Pels Leusden, C. O.:* Ablauf und Beeinflussung der Texturbildung während der Formgebung. Ziegelindustrie 38 (1985) 7, S. 390 bis 405

[140] *Händle, F.:* Formgebung. Sonderdruck aus Ziegelindustrie international Nr. 1/82, S. 14 bis 22

[141] *Bender, W.* und *Lutz, D.:* Sonderzubehör für Vakuumaggregate. Keramische Zeitschrift 36 (1984) 6, S. 301 bis 305

[142] *Bucek, H.:* Dampfanwendung zur Heißaufbereitung, Heißverformung und Trocknung in der grobkeramischen Industrie. Silikatjournal 8 (1969) 1, S. 20 bis 22

[143] *Grätz, R.:* Einflußgrößen bei der plastischen Formgebung auf Eigenschaften grobkeramischer Erzeugnisse. Keram. Z. 29 (1977) 1, S. 15 bis 18

[144] *Meister, B.:* Zu Fragen des Rohbruches bei der Rollerverformung. Silikattechnik 25 (1974) 4, S. 132 bis 134

[145] *Beyer, B.:* Untersuchung eines neuen Formgebungswerkzeuges zur Herstellung von Flachgeschirr. Silikattechnik 19 (1968) 12, S. 386 bis 392

[146] *Blumb, R.:* Entwicklung einer Heizung für Rollerwerkzeuge der Geschirrindustrie. Ilmenau: Technische Hochschule, Diplomarbeit, 1978

[147] *Prochazka, V.* und *Fosenbauer, R.:* Formgebungsfehler flacher Porzellanerzeugnisse. Sklář a keram. 15 (1965) 3, S. 84 bis 86

[148] *Entelis, F. S.* und *Smirnova, A. J.:* Untersuchungen des Formgebungsprozesses von Tellern durch einen rotierenden profilgebenden Roller. Trudy gos. nauc.-issl. keram. Inst. Leningrad 45 (1962) 1, S. 22 bis 33

[149] *Richter, C.* und *Albrecht, K.-D.:* Zur Formgebung feinkeramischer plastischer Massen. Silikattechnik 14 (1963) 6, S. 180 bis 185

[150] *Brückner, E.:* Neue Erkenntnisse über die Verformung von Porzellanmassen. Keram. Z. 18 (1966) 12, S. 866/867; 19 (1967) 3, S. 157/158

[151] Richtlinie für den Einsatz von Feuerbetonfertigteilen, feuerfesten Gemengen und Plastiks in und an Dampferzeugern. Institut für Kraftwerke, WTZ der VVB Kraftwerke

[152] *Bachmann, E.:* Keramische Verfahrenstechnik 3; Aufbereitung und Aufbereitungsmaschinen, 2. Lehrwerk für das Ingenieurfernstudium. Institut für Fachschulwesen der DDR, Karl-Marx-Stadt 1966

[153] *Bachmann, E.:* Keramische Verfahrenstechnik 4, Formgebung und Formgebungsmaschinen, 1. Lehrwerk für das Ingenieurfernstudium. Institut für Fachschulwesen der DDR, Karl-Marx-Stadt 1966

[154] *Blackburn, A. R.:* Plastic Pressing-A New Production Tool for the Ceramic Industry. Bull. Amer. Ceram. Soc. 29 (1950) 6, S. 230 bis 234

[155] *Kieffer, R.:* Formgebung durch plastisches Verpressen von keramischen Massen auf ölhydraulischen Stempelpressen. Keram. Z. 31 (1979) 3, S. 156 bis 158

[156] *Ott, R.:* Das RAM-Verfahren. Keram. Z. 27 (1975) 6, S. 301 bis 303

[157] *Frisch, E.; Thiele, W. R.* und *Peter, M.:* Zum Einfluß von Zwischenschichten auf Preßverdichtung und Scherbeneigenschaften feinkeramischer Massen. Ber. DKG 54 (1977) 7, S. 224 bis 229 und 8, S. 259 bis 263

[158] *Bockstiegel, G.* und *Hewig, J.:* Kritische Betrachtungen des Schrifttums über den Verdichtungsvorgang von Pulvern in starren Preßformen. Arch. Eisenhüttenwesen 36 (1965) 10. S. 751 bis 767

[159] *Kawakita, K.* und *Lüdde, K. H.:* Powder Technology 4 (1970/71), S. 61 bis 68 (zitiert in [11])

[160] *Bouchner, B.:* Der Einfluß von fester, flüssiger und Gasphase beim Pressen keramischer Massen. Sprechsaal 108 (1975) 9, S. 506 bis 512

[161] *Plaul, Th.:* Die Masseeigenschaften im Winklerdiagramm. Silikattechnik 13 (1962) 10, S. 361 bis 365

[162] *Konopicky, K.:* Feuerfeste Baustoffe. Düsseldorf: Verlag Stahleisen 1957

[163] *Harders, F.* und *Kienov, S.:* Feuerfestkunde; Herstellung, Eigenschaften und Verwendung feuerfester Baustoffe. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer Verlag 1960

[164] *Fuller, W. B.* und *Thomsen, S. E.:* Versuche zum Betonmischungsverhältnis zur Sicherstellung maximaler Festigkeit und Dichte. Eng. News Rec. 57 (1907), S. 599 bis 602

[165] *Andreasen, A. H. M.:* Die Feinheit fester Stoffe und ihre technologische Bedeutung. Berlin: Ver. Dtsch. Ing. Forsch.-H. 399, 1939

[166] *Litzow, K.:* Über den Einfluß der Kornverteilung der Schamotte auf die Dichte feuerfester Materialien. Glastechn. Ber. 8 (1939), S. 149 bis 153

[167] *Hausner, H. H.* und *Sheinhartz, J.:* Proc. 10th Annual Meeting Metal Powder Ass. 1954, S. 6 bis 27

[168] *Frisch, B.* und *Smidoda, K.:* Zur Grenzflächenhaftung beim Pressen von Feststoffteilchen im Vakuum und unter Sorptionsschichten. Ber. DKG 53 (1976) 12, S. 428 bis 433

[169] *Kröckel, O.:* Wissensspeicher Isostatische Fertigung. I. Einführung, II. Sprühtrockner, III. Isostatisches Pressen, IV. Weißformgebung. VEB Elektrokeramische Werke Sonneberg, 1984

[170] *Schulz, P.; Pfaff, E.* und *Zografon, C.:* Der Einfluß des Bindergehaltes auf die Bildung und Eigenschaften von Sprühgranulat. Keram. Z. 34 (1982) 10, S. 561 bis 564

[171] *Rötger, G.:* Flachgeschirrfertigung im Trockenpreßverfahren, System Netzsch. Betriebsinformation 1985

[172] *Welter, A.:* Das Verpressen staubförmiger bis körniger, besonders feuerfester Massen und Beachtung der Preßmethode. Sprechsaal 100 (1967) 21, S. 843 bis 846, 101 (1968) 1, S. 5 bis 7 und 4, S. 135 bis 142

[173] *Madden, H. D.:* Process of prepearing billets of refractory materials. US-PS Nr. 1081718 vom 16. 12. 1913

[174] *Papen, E. L. J.:* Isostatisches Pressen – ein modernes Produktionsverfahren. Sonderdruck von Interceram. Nr. 4 (1967) und 1, 2, 3,

[175] *Heckel, R. W.:* Density-pressure relationships in powder compaction. Trans. of Mat. Soc. AIME 221 (1961) 8, S. 671 bis 675

[176] *Melzer, D.:* Beitrag zum isostatischen Pressen feinkörniger keramischer Massen. Dissertation Bergakademie Freiberg 1983

[177] *Melzer, D.:* Isostatisches Pressen keramischer Pulver und Körnungen. Freiberger Forschungsheft A 626 (1980) Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie

[178] *Melzer, D.:* Die Bedeutung einiger verfahrenstechnischer Parameter bei der Anwendung der isostatischen Preßtechnik. Silikattechnik 31 (1980) 3, S. 78 bis 80

[179] *Papen, E. L. J.* und *Raes, H. D. B.:* Erfahrungen mit dem Einsatz von isostatischen Pressen. Silikat-Journal 13 (1974) 8/9, S. 183 bis 192

[180] *Harkort, D.* und *Kling, H. G.:* Formstücke mit einer hohen Oberflächengüte, die in einem Arbeitsgang durch isostatisches Pressen erlangt werden. Ind. Ceram. Paris (1968) 603, S. 23 bis 27

[181] *Harkort, D.* und *Kling, H. G.:* Einige Untersuchungen mit dem quasi-isostatischen Preßverfahren. Tonind.-Ztg. 92 (1968) 3, S. 81 bis 85

[182] *Ermel, D.:* Isostatisches Pressen in Quintus-Technik. Ber. DKG 49 (1972) 3, S. 89 bis 91

[183] *Ermel, D.:* Isostatisches Pressen und seine Anwendungsmöglichkeiten. Sprechsaal 115 (1982) 10, S. 955 bis 960; 116 (1983) 2, S. 94 bis 99; 116 (1983) 3, S. 172 bis 177

[184] *Schwendener, H.:* Rationelles Produzieren in der keramischen Industrie mit isostatischen Pressen. Keram. Z. 25 (1973) 3, S. 130 bis 133

[185] *Bloch, G. S.* u. a.: Halbtrockenes Pressen von keramischen Rohren. Steklo i Keramika 12 (1955) 6, S. 17 bis 19

[186] *Bloch, G. S.* u. a.: Halbtrockenpressen von Kanalisationsrohren nach dem hydrostatischen Verfahren. Steklo i Keramika 18 (1961) 4, S. 24 bis 27

[187] *Fischer, P.:* Isostatisches Pressen von Steinzeugrohren. Ber. DKG 44 (1967) 3, S. 94 bis 96

[188] *Mindrup, W.* und *Ermel, D.:* Isostatisches Pressen nach dem Quintus-Verfahren. Keram. Z. 23 (1971) 9, S. 510 bis 514

[189] *Mechthold, W.:* Automatisches Kopieren von Hochspannungsisolatoren. Silikattechnik 9 (1958) 6, S. 260 bis 264

[190] *Brückner, E.:* Formgebung von Hochspannungsisolatoren. Keram. Z. 20 (1968) 2, S. 86 bis 88

[191] *Bareuther, G.:* Maschinen für die Herstellung von Hochspannungsisolatoren. Keram. Z. 30 (1978) 2, S. 83/84

[192] *Ruzicka, S.:* Bearbeitungsmaschinen für isostatisch gepreßte Erzeugnisse. Izostatické lisovanie v keramike. Dom techniky ČSVTS Bratislava, 1981, S. 19 bis 28

[193] *Koch, H.:* Herstellung von Hochspannungs-

isolatoren. Keram. Z. 28 (1976) 7, S. 353 bis 355

[194] *Schubert, H.:* Keramische Einflußfaktoren auf die Festigkeit von Hochspannungsisolatoren. Sprechsaal 108 (1975) S. 335 bis 341

[195] *Fleischmann, W.:* Formgebung ungeformter, feuerfester, feuerbeständiger und isolierender Erzeugnisse. Keram. Z. 29 (1977) 1, S. 21/22

[196] Pulvermetallurgie. Trend zum Heißpressen und ähnlichen Verfahren. Sprechsaal 109 (1976), S. 539/540

[197] Möglichkeiten zur Kostensenkung beim Betrieb von Industrieöfen und Feuerungsanlagen durch den Einsatz des Torkretspritzverfahrens (fugenlose monolithische Bauweise). Sprechsaal 109 (1976), S. 599

[198] VEB Stahl- und Walzwerk Brandenburg, Werksunterlagen

[199] *Wedemeyer, R.:* Spritzgießen unplastischer, keramischer Werkstoffe. Sprechsaal 109 (1976) S. 347 bis 351

[200] *Handke, H.:* Spritzgußtechnik als Formgebungsverfahren zur Herstellung feinkeramischer Erzeugnisse. Ber. DKG 51 (1974) 4, S. 97 bis 101

[201] *Handke, H.:* Formgebung mit Keraplast-Dauerformen. Sonderdruck aus Silikatjournal 15 (1976) 7

[202] Spritzprägen von keramischen Formteilen. Ber. DKG 55 (1978) 2, S. 117/118

[203] *Riedel, G.:* Erfahrungen bei der Formgebung von Gehäuseschalen aus Al_2O_3-Keramik. Silikattechnik 36 (1985) 8, S. 245 bis 247

[204] *Degner, W.; Lutze, H.* und *Smejkal, E.:* Spanende Formgebung. Berlin: VEB Verlag Technik 1978

[205] Forschungsinstitut für Elektrokeramik, Hradec Králové, Entwicklungsunterlagen

[206] Elektroporzellan Louny: Technische Dokumentation über die Fertigung von Vollkernstützern durch isostatisches Pressen

[207] *Meyer-Hartwig, E.:* Das Reaktions-Sintern. Ber. DKG 33 (1956) 3, S. 85 bis 91

[208] *Ulbricht, J.:* Thermoplastische Formgebung feuerfester Alumosilikate. In: Herstellung, Eigenschaften und Anwendung keramischer feuerfester Werkstoffe. Freiberger Forschungsheft A 601, Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1978

[209] *Prümmer, R.:* Die Verdichtung von Keramik- und Metallpulvern sowie deren Mischungen durch Explosivdruck. Ber. DKG 50 (1973) 3, S. 75 bis 81

[210] *La Rocca* und *Pearson, I.:* Explosive press for use in implosive loading studies. Rev. Sci. Instr. 29 (1958), S. 848

[211] Gebrüder Netzsch Maschinenfabrik GmbH & Co., Selb, Prospektmaterial

[212] Gießmaschine der Fa. Ceradel Elmetherm. Ind. céram., Paris, Nr. 768 (1983) 1, S. 50

[213] Europas modernste Gießanlage für Bodenvasen. Keram. Z. 32 (1980) 2, S. 71 bis 75

[214] *Morávek, J.:* Möglichkeiten der Intensivierung des Gießprozesses. Keram. Z. 35 (1983) 3, S. 130 bis 132

[215] VEB Thuringia Sonneberg, Kombinat für Glas- und Keramikmaschinenbau, Werksunterlagen

[216] Maschinen- und Stahlbau Julius Lippert GmbH & Co., Pressath; Werksunterlagen

[217] *Wagner, J.:* Vorrichtung zum Herstellen von keramischen Hohlgefäßen im Gießverfahren. Offenlegungsschrift DT 24 28 897 A1 vom 18. 12. 75

[218] Dorst-Maschinen- und Anlagenbau, Kochel am See; Betriebsunterlagen

[219] *Jung, B.:* Formen zur Herstellung von Formteilen aus keramischen Massen. Offenlegungsschrift DE 31 34 679 A1 vom 24. 6. 82

[220] *Grätz, R.:* Entstehung und Beurteilung der Texturen beim Strangpressen. Keram. Z. 32 (1980) 2, S. 76 bis 79

[221] *Händle, N.:* Neue Lösungen für die Aufbereitung und Lagerung von keramischen Massen und neue Erfahrungen in der Extrusion mit modernen Extrudern, Teil 3. Silikat-Journa 18 (1979) 1, S. 12 bis 20

[222] VEB KEMA Görlitz, Betrieb im VEB Thuringia Sonneberg, Kombinat für Glas- und Keramikmaschinenbau, Werksunterlagen

[223] *Plaul, Th.:* Technologie der Grobkeramik, Bd. 6. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1968

[224] *Krause, E.:* Anforderungen an die Weiterentwicklung von Maschinen für die Grobkeramik und Ergebnisse der internationalen Zusammenarbeit mit dem Keramikmaschinenbau der ČSSR. Silikattechnik 34 (1983) 8,S. 238/239

[225] *Kämpf, L.:* Vorrichtung zur Bekämpfung von Texturen bei stranggepreßten Profilen. Silikattechnik 16 (1965) 11, S. 351 bis 354

[226] *Pels Leusden, C. O.:* Mundstückgestaltung für eine spannungsarme Formgebung. Ber. DKG 47 (1970) 6, S. 345 bis 390

[227] *Limburg, K.:* Maschinelle Produktion von Glashäfen. Keram. Z. 32 (1980) 2, S. 80

[228] Maschinenfabrik J. Diffenbacher Gmbh & Co., Prospektmaterial

[229] *Wittmeier, W.:* Elektronische Reglung bringt optimale Stranggeschwindigkeit. Keram. Z. 36 (1984) 6, S. 291 bis 294

[230] *Steffens, E.:* Typenreihe Vakuumpressen PVP mit Nachfolgeeinrichtungen. Vortrag Leipzig: Frühjahrsmesse 1985

[231] VEB Rationalisierung Vakuumtechnik Sangerhausen, Betrieb im VEB Kombinat Anlagen- und Gerätebau Halle; Werksunterlagen

[232] *Steffens, E.; Paape, F.; Döhring, G.; Kerbe, F.* und *Netzmann, H.:* Automatische Fertigungslinie für keramische Strangpreßerzeugnisse. Silikattechnik 32 (1981) 3, S. 73

[233] *Paape, F.* und *Steffens, E.:* Funktion und Einsatzgebiete der neuen vollautomatischen Fertigungslinie für die Elektrokeramikindustrie. Silikattechnik 34 (1983) 8, S. 228 bis 233

[234] Karl Händle & Söhne GmbH & Co. KG., Mühlacker; Werksunterlagen

[235] *Händle, F.:* Neue Erkenntnisse und Entwicklungen bei der Verformung grobkeramischer Massen. Vortrag Salzburg: 29. Arbeitstagung der VÖZ

[236] *Segerer, H.:* Über die Auswirkung der Bildsamkeit von Porzellanmassen beim Überformvorgang auf einer Rollermaschine. TU Clausthal, 1982: Dissertation an der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen

[237] *Schafheutle, F.:* Formgebung von Dachziegeln. Keram. Z. 33 (1981) 3, S. 145 bis 147

[238] *Faulwetter, J.:* Die Entwicklung von Naßpreßvollautomaten für die technische Keramik. Silikattechnik 11 (1960) 5, S. 224 bis 226

[239] Maschinenfabrik SACMI, Imola/Italien; Werksunterlagen

[240] *Fischer, E.:* Automatisches isostatisches Pressen. Sprechsaal 106 (1973) 3, Sonderdruck

Sachwörterverzeichnis

Abdeckring 176
Abdichtung 66, 108
Abdichtungsfehler 68
Abdrehen 111, 216
Abdrehgeschwindigkeit 216
Abdrehmesser 111
Abdrehwerkzeug 216f.
Abdrücken, gesteuert 198
Abdrücken, schwimmend 198
Abfedern 96
Abkippstation 166
Ablaufsteuerung 129
Abnahmestation 202
Absaugvorrichtung 196
Abschirmung 92
Abschneider 73, 78, 141, 143, 163, 165ff., 169, 171, 214
Abschneiderzylinder 162
Abschneideverfahren 142
Absenkhub 78
Absorption 122
Abstoßung, elektrostatische 17, 21
Abstreicher 189
Abstumpfen 39, 49, 126
Abstumpfzeit 32
Abstützung, hydraulische 97f.
Abtastkopf 215
Abtastung, fotoelektrische 112
Abtastvorgang 215
Abtropfbereich 132
Abzugstellung 179, 181
Abzugweg 179
Abzweigdose 176
Acetatmethode, NH^{4+}- 17
Adhäsion 88
Adsorption 16, 23
Aggloporit 81
Al_2O_3-Keramik 110
Aluminiumnitrid 110
Analog-Digital-Wandler 159
Anisotropie 60
Ankleben 75, 81, 90, 93, 174
Anlaßwert 19, 24, 29, 34, 43, 60ff.
Anmachwasser 35, 61, 63, 69
Annäherungsgeschwindigkeit 74f.
Anode 56f., 174
Anodenkorrosion 57f.
Anodenwerkstoff 58
Ansteifen 42
Ansteuerelektronik 197
Anteil, plastischer 45
Anteil, unplastischer 45
Antrieb 138, 151, 176
—, obenliegender 177
Antriebsleistung 159
Antriebswelle 172
Antrocknen 51
Anziehungskraft 88
Anziehungskraft, *van der Waals*-sche 21
Arbeit 86
Arbeitsfehler 54
Arbeitsform 156, 160, 166
Arbeitsgang 198
Arbeitskreis 209
Arbeitstakt 177, 188
Arbeitszyklus 210, 216
Arbeitszylinder 188, 194ff.
Artenfehlordnung 15
Assemblersprache 197
Äthanol 48
Aufbaugranulieren 80f.
Aufgabeschnecke 65
Aufgabevorrichtung 214
Auflageklotz 187
Auflast 199
Aufnahmebohrung 156
Aufnahmedorn 214
Aufnahmezapfen 156
Aufpresser 190
Aufrißzeichnung 155
Ausbrennstoff 92
Ausdrehmaschine 113
Ausflockung 23
Ausformen 60
Ausformhub 163
Ausformkurve 157
Ausformparameter 159
Ausformspindel 155f., 159f., 169, 172
Ausformstation 160ff., 168f.
Ausformtemperatur 75
Ausformung 172
Ausgießen 50, 124
Ausgußstation 124
Auslaufbecher 32
Auslaufviskosimeter 31f., 39
Auslaufzeit 32, 38ff.
Auspreßwasser 173
Ausrichtung 36
Ausschieberleiste 189
Ausschneiden 54
Außenform 143
Außenkopieren 214
Aussparung 111, 113
Ausstöpseln 49
Ausstoß 198
Ausstoßen 195
Ausstoßer 169, 172, 174f.
Ausstoßkraft 175, 186
Ausstoßvorgang 188ff.
Ausstoßvorrichtung 176
Ausstoßweg 201
Austragsschnecke 65
Austragsvorrichtung 196
Austrittsgeschwindigkeit 138
Austrittshöhe 152
Austrittsquerschnitt 154
Auswerfen 101, 106
Automatisierbarkeit 83
Axialkolbenpumpe 196ff.

Bajonettverschluß 108
Basisfläche 16
Batteriegießanlage 124
Baukeramikerzeugnis 64
Bearbeitungswerkzeug 111
Becher 156
—, unrunder 78
Becherfertigung 73
Becherfertigungslinie Be 2-L 160ff.
Bedientableau 197
Beidellit 14
Belegungsautomatik 149f.
Bentonit 14, 19
Beölung 174

Beschicker 142ff.
Beschleunigung 158
Bestandteil, unplastischer 19
bildsam 35
Bildsamkeit 23ff., 33, 68
Bildsamkeitsmessung 159
Bindeflüssigkeit 115
Bindemittel 90, 93f., 115
—, organisches 59
Bindung, formschlüssige 88
Bindung, interpartikulare 24
Bingham-Fließen 60
Bingham-Körper 29
Blähen 81
Blähton 81
Blattdosieranlage 156, 166
—, BD 1 166f.
Blattquetsche 72, 74, 76f., 165f.
Blattquetscheinrichtung 156
Blattquetschen 76
Blattquetsch- und -übertragungseinrichtung BQ 1 166
Blattstärke 167
Blattumsetzer 165f.
Blechschablone 76, 112
Blitzriß 54
Blumentopfpresse 82, 173
Boden, durchgehender 77
Bohrkopfantrieb 214
Bohrkopfvorschub 214
Bohr- und Kopierdrehmaschine, kombinierte 113
Bord 163
Borid 120
Braunkohle 48
Bremsgetriebemotor 196
Bremsung, elektrophoretische 18
Brennhilfsmittel 194
Brennschwindung 90, 216
Brikettieren 80, 176
Brombeereffekt 93
Bügelabschneider 141, 160
Bügelriß 139
Bügelschnitt 141f.

Calcit 19
Carbid 109, 120
Carbonathärte 48
Carboxylgruppe 92
Carboxylmethylcellulose 48
Cermet 109, 120
Chlorit 15
Couette-Spalt 60
*Coulomb*kraft 18

Dampfdruck 68, 93
Dampffilm 75
Darvan 48
Datenverarbeitungsanlage 159f.
Dauerform 119
Dauerfutter 116
Deckelabnehmer 125
Deckstück 49, 126
Deformation 28, 54
Deformationsgeschwindigkeit 60f.
Dehnanker 194
Dehnmeßstreifen 35
Dehnung, thermische 54
Dekompression 108
Dekompressionselement 107
Dekompressionsphase 103
Destabilisierung 23
Detonationsfront 121f.
Detonationsgeschwindigkeit 122
Dichte 198
—, theoretische 109f.
Dichteverteilung 96f., 192
Dickit 15
Differenzgeschwindigkeit 61, 72, 74f., 77
Diffusionskoeffizient 43ff.
Diffusionsvorgang 43
dilatant 41, 60
Dilatanz 30
dioktaedrisch 15
Dipol 16
Diskettenspeicher 159
Dispergierungsmittel 14, 23, 30, 57, 59
Dispersion, kolloide 16
Dispersionskraft 27
DLVO-Theorie 21, 48
doctor-blade-process 58
Dolomit 19
Doppeldruck 87
Doppelfalzdachziegel 81
Doppelfülleinrichtung 191
Doppelmembranpumpe 133
Doppelpreßkopf 160, 162
Doppelschicht 22
—, elektrische 16f., 19f., 25
Doppelschnecke 154
Doppelwellenmischer 64, 68, 152
Doppelzylinder 152, 154
Dörr/Wäge-Methode 31
Dosiertrommeltorkretiergerät 116
Dosiervorrichtung 50
Drachenzahn 70ff.
Drahtharfe 72
Drehen 72, 155ff.
Drehfeldmagnet 214
Drehmaschine DG 1 168ff.
Drehmaschine für Großgeschirr DG 1 164
Drehmasse 65
Drehrichtungswechsel 158
Drehscheibe 213f.
Drehschieber 176
Drehslinger 116
Drehtisch 156, 199ff.
Drehtischpresse 102, 174, 176, 199ff.
Drehvorrichtung 175
Drehwerkzeug 111
Drehzahl 77, 159, 172, 201
Dreischichtmineral 15
Dreischneckenpresse 65, 138
Druck 83ff., 95ff., 122, 127
—, doppelseitiger 100, 184
—, einseitiger 184
Druckabbau 207
—, regelbarer 196
Druckabbaugeschwindigkeit 104
Druckabfall 86, 90
Druckaufbau 196
—, isostatischer 209
Druckbehälter 102
Druckdurchgang 85ff., 91f.
Druckdurchgriff 96
Druckelektroosmose-Verfahren 57
Druckerzeuger 107
Druckfestigkeit 92
Druckfiltration 55
Druckfluß 67
Druckguß 55f.
Druckgußanlage 127
—, halbautomatische, DG 160 133ff.
Druckgußform 133
Druckkolben, hydraulischer 98
Druckluftkupplung 152
Druckmeßeinrichtung 154
Druckminderventil 55, 207
Druckmittelkanal 207
Druckraum 194
Druckrückgang 212
Druckschalter 198
Druckspeicher 97, 197
Druckspitze 100
Druckstempel 95f.
Drucksübersetzer 196, 207, 209f.
Druckübertragung 110
—, isostatische 196
Druckübertragungsmedium 121
Druckverteilung 85, 97
Druckzone 152
Druckzylinder 184
Durchführung 111, 212
Durchpressen 86
Durchsatz 61, 143
Durchsatzleistung 152, 155
Düse 118
Düsentrockner 128, 133
Düsenzerstäuber 94

Ecke, abgebrochene 193
Eckriß 192
Edelkorundschleifscheibe 212
Eilgang 194f., 198, 210
Eilgangzylinder 133
Einformen 72, 164
Einfrieren 60
Eingießen, automatisches 124
Eingießgeschwindigkeit 38
Eingießstation 127f., 130ff.
Eingußsteg 51
Einkammerdruckgefäßtorkertiegerät 116
Einkorngemisch 88
Einräumer 145
Einräumerschale 148

Einräumerwalze 65f., 138, 162
Einrichten 202
Einschneckenpresse 65, 138, 160
Einstellwinkel 155
Einwellenmischer 64, 138
Einzelschnitt 142
Einzugswalze 65
Eislinsenbild 71
Elastizität 108
Elektrode 132
Elektrodenstempel 57
Elektrohubmagnet 214
Elektrokeramik 142
Elektrolyt 23
Elektrolytgehalt 21, 24, 35
—, optimaler 40
Elektrolytkombination 42
Elektromagnet-Einflächenkupplung 201
Elektromagnetkupplung 160, 177
Elektroneutralität 15ff.
Elektroosmose 174
Elektrophorese 56, 174
Elektroschockablösung 174
Elektrostampfer 114
elektrostatisch 15
Elephand 57
Endmesser 139, 145, 162
Endpressung 173
Endschalter 198, 210f.
Energiebedarf 63
Energie, elektrostatische 47
Energieverbrauch 58
*Enslin*wert 33f.
Entflocker 23
Entformbereich 133
Entformung 137
Entformungsmaschine 125f.
Entlastungszeit, kritische 105
Entlüftung 65f., 94ff., 151, 177, 186, 190
Entlüftungshub 173, 198
Entlüftungskanal 207
Entlüftungsloch 174
Entlüftungsziegel 174
Entmischung 39, 54
Entnahmestation 127f.
Entropieelastizität 118
Entspannung 212
Entstaubung 83
Entstaubungsanlage 206
Entwässerung 119
Entwässerungskurve 58
Epilamenschicht 92
EPROM 197
Ersatz, diadocher 16
Ersatz, isomorpher 15
Erstarrung 117
Erstarrungsgeschwindigkeit 118
Erstarrungsvorgang 43
Erzeugnis, setzfähiges 70
Erzeugnisspannung 59
Evakuierung 66, 105
Explosivdruck 122
Explosivkompaktieren 120
Explosivverdichten 120
Exzenter 172f.
Exzenterpresse 81, 102, 173, 176, 178
Exzenterradpaar 182
Exzenterwelle 172

Fahne, krumme 77f.
Fahnenriß 78
Fassonschnitt 141f.
Fallhammer 115
Falz 49
Falzdrückeinrichtung 171
Feder 158
Fehlordnung 15f.
Feinabdrehen 216
Feingang 198
Feinkeramik 65
Feinkornanteil 89
Feldspat 19
Ferrarismotor 151
Fertigpressen 185f.
Fertigpreßkraft 186
Fertigungslinie 155
Fertigungslinie, automatische, für keramische Strangpreßerzeugnisse, Typ AFA 149ff.
Fertigungslinie für Hohlware G114 129ff.
Festkörperbrücke 88
Festonieren 163
Feststoffanreicherung 43
Feststoffgehalt 30
Festwertspeicher 197
Feuchtegradient 174
Feuchtigkeit 34, 62, 93, 111, 164, 209
Feuchtigkeitsgehalt 83, 187, 192
Feuchtigkeitsmeßverfahren 30
Feuchtigkeitsverteilung 85
Feuerbeton 79
Feuerbetonfertigteil 114
Feuerfesterzeugnis 176
Feuerfestkeramik 79, 82, 84, 194, 201
Feuerfestmasse 83
*Fick*sches Gesetz 44
Filterwiderstand 55
Filtrationstheorie 44
Filtrationsvorgang 43
Fingerschutzring 176
Firstziegel 174
Flachgeschirr 72, 77, 202, 205
Flachgeschirrpresse, hydraulische, mit isostatischer Verdichtung gemäß Fig. 230.02 205ff.
Flachgeschirrpresse, isostatische 206
Flachgeschirrpressen, isostatisches 109
Flachstanztechnologie 142
Fleck 193
Fliese 83, 176, 184, 187
—, befallene 194
—, keilige 193
—, krumme 193
Fliesenpresse 101, 184ff.
—, hydraulische, PY 500 187ff.
Fließdruckmessung 33, 35
Fließeigenschaft 31, 60
Fließen 24, 28
—, *Bingham*sches 28f.
—, dilatantes 28f.
—, elastisch-plastisches 24
—, *Newton*sches 28f., 53
—, pseudoplastisches 28f.
—, quasiplastisches 29, 60
—, strukturviskoses 118
—, viskoses 24
Fließgrenze 29, 61
Fließgrenzenverteilung 61
Fließkurve 28, 40, 60
Fließlinie 77, 191
Fließmodell 28
Fließrichtung 77
Fließtextur 119
Fließwert 25
Fließwiderstand 28
Flockung 20, 22
Flügelnabe 138
Flüssigkeit, *Newton*sche 28
Flüssigkeit, strukturviskose 60
Flüssigkeitsringpumpe 138
Folgesteuerung 129
—, elektrohydraulische 209
Foliengießen 58
Foliengießschlicker 58
Förderleistung 66
Förderrichtung 154
Form 114, 119, 124
—, abgefederte 95
—, bewegliche 96, 98f.
—, elastomere 102, 106f.
—, elektrisch nichtleitende 57
—, feststehende 85f., 95, 100
—, flexible 106
—, gestützte 95
—, poröse 173
—, rotierende 50, 53, 55
Formaldehyd 48
Formanschlag 196
Formdrehstahl 112
Formenabsenkvorrichtung 99
Formenanzahl 126, 129
Formenarretierung 132
Formenaufnahme 156, 170, 172
Formenausstoßer 169ff.
Formenbewegung 97
Formenblock 124, 126
Formenbruch 78
Formenkette 163
Formenrücktrocknung 50, 125ff. 130ff.
Formenschließen 209
Formenschnitt 49, 51
Formensystem 173

Formenumlauf 129
Formenumsetzer 164, 166, 169, 172
Formenwand 47, 84
Formenzentriervorrichtung 131
Formenwechsel 137
Formenwerkstoff 108
Formgebung
—, bildsame 137
—, plastische 59ff.
—, reaktionsthermische 119
—, spanabhebende 111f.
—, thermoplastische 120
Formgebungsfehler 50, 70ff., 77f.
Formgebungsverfahren 38ff.
—, plastisches 13
—, unplastisches 13
Formkasten 184
Formling, lederharter 119
Fotoskop-Steuergerät 214f.
Fotowiderstand 215
Fotozelle 141, 160, 166, 215
Frässchnecke 138
Freiwinkel 217
Friktionsscheibe 178
Friktionsspindelpresse 82, 174, 176, 178
Frischmasse 114
Füllausgleich 196
Füllen 101, 106, 109
Füllfaktor 198
Füllgrad 145
Füllhöhe 181, 198, 201
Füllhöhenkorrektur 199
Füllhöhenregelkreis 197
Füllhöhenregelung 197
Füllkasten 195f.
Füllraum 207
Füllriß 192
Füllschieber 174f., 188ff., 194ff., 198, 209f.
Füllschiebersystem 207
Füllschuh 179, 181f.
Füllstand 132
Füllstandselektrode 127
Füllstation 202
Füllstellung 179, 181, 183, 188
Füllventil 194, 198
Füllvorgang 182, 188ff.
Füllvorrichtung 176
Fuß, nicht fertig ausgeformter 78
Fußdurchmesser 155
Fußglättisch 206, 208
Fußhöhe 155
Fußriß 54, 78

Garnieren 50f., 78, 163, 166
Garniermaschine 79
Garnierschlicker 78
Gasdruckanlage 202f.
Geber, inkrementaler, rotatorischer 151
Gedächtnis 26, 118
Gefüge 36, 59
Gegenhalter 214
Gegenion 25
Gegenmesser 72, 138
Gegenschablone 155f.
Gehäuseschale 182
Gel 29
Gemenge, feuerfestes 114ff.
Gerätestecker 176
Gerbstoff 48
Geschirr 72ff.
Geschwindigkeitsgefälle 59
Geschwindigkeitsverteilung 72
Getriebe 152
Getriebemotor, verstellbarer 159, 169
Getriebewelle 152
Gewinde 175
Gewindering 176
Gießanlage 124ff.
Gießband 125
Gießbandanlage für WC-Becken 124f.
Gießbank 124
Gießelevator 52, 124
Gießen 13, 38ff., 124ff.
—, maschinelles 50
gießfähig 20ff., 39
Gießfehler 50, 52ff.
Gießfleck 53
Gießform 46
Gießkaolin, Salzmünde 48
Gießkaolin, Spergau 48
Gießkegel 50
Gießlinie 38
— GK 80 127ff.
Gießlochdurchmesser 129
Gießmaschine 50, 125
Gießmasse 31, 38ff., 49
Gießmasseeigenschaften 48
Gießmengenregelung 132
Gießpfanne 116
Gießpore 53
Gießrille 42, 53
Gießschlauch 50, 132
Gießschlicker 20
Gießschliere 52
Gießspan 46
Gießstation 124, 126, 132
Gießtaktstraße 124
Gießtechnologie 39ff., 49ff.
Gießventil 127
Gips 19, 160
Gipsbelag 173
Gipsform 38f., 43, 45f., 55, 73, 77, 124, 163f.
Gipsformenhalbschnitt 155
Gipskern 51
Glasform 110
Glasschmelzhafen 142
Glattwalze 64
Gleichfeld, elektrisches 57
Gleichlauf 178, 181
Gleichstromkorrosion 174
Gleitebene 61
—, hydrodynamische 18
Gleiteigenschaft 93f.
Gleitfähigkeit 90
Gliederkette 160
Glimmer 19
Glimmergehalt 54
Glocke 70, 143
Glühscherben 45
Granalie 81, 93
Granulat 27, 80, 196, 202, 209
Granulatfeuchte 104
Granulieren 80, 117
Granulierteller 81
Granuliertrommel 81
Graphitform 110
Grat 193
Greiferarm 169
Greifereinrichtung 174f.
Grenzanlaßwert 43
Grobkeramik 65
Großgeschirr 156
Großgeschirrfertigungsanlage FH1 und FF1 164ff.
Grünfestigkeit 88
Gummifolie 174
Gummiform 102, 174, 210ff.
Gummimembran 174
Guß
—, elektrophoretischer 56, 127
—, kombinierter 52
—, steigender 53, 55

H^+-Ion 23
Halbsteifverpressung 64, 69, 138, 152
Halloysit 14f.
Handstreichverfahren 79
Harfenschnitt 141f.
Hartgips 173
—, kunststoffgebundener 173
Hartgipsform 55
Hartmetall 111
—-Preßwerkzeug 201
Haspel 138, 154
Hauptdruck 177, 184, 192
Hebebühne 128
Hebezeug 108
Hectonit 14
Heißformgebung 64
Heißisostatik 105
Heißisostatikanlage 202f.
Heißpressen 105, 109f.
Heißverformung 68
Heißverpressung 139
Heizelement 75
Heizleiter 110
Heizspannung 184
Heizwendel 75
*Helmholtz*schicht, äußere 22
*Helmholtz*schicht, innere 22
Henkel 78
Henkelgarniermaschine 163
Henkelherstellung 42

HIP-Prozeß 110
Hitzewelle 78
Hochdruck 188
Hochdruckflüssigkeitsstrahl 151
Hochdruckgefäß 107
Hochdruckpumpe 137
Hochdruckrezipient 107
Hochleistungsexzenterpresse 180f.
Hochleistungsexzenterpresse mit Matrizenabzug, Typ TPA 182ff.
Hochleistungspreßautomat TPA 6 182f.
Hochleistungsrundlaufpresse 199f.
Hofmeister-Serie 20, 22
Hohlgeschirr 78, 166
Hohlguß 49f., 124
Hohlgußartikel 130
Hohlgußverfahren 38
Hohlhubel 65, 107, 142
Hohlraumnachverfestigung 133
Hohlstrang 139
Hohlwelle 152
Homogenisierung 65, 154
Homogenität 27, 35
Homogenitätsprinzip 14, 61, 114
Horizontalpresse 65
Horizontalsupport 214
Hub 133
Hubel 63, 68, 70, 76, 93, 106, 111, 113, 166, 212, 214
—, istostatisch gepreßter 111, 216f.
—, weißtrockener 216
Hubeleinlegevorrichtung 160f.
Hubelüberwachung 113f.
Hubkolben-Naßluftpumpe 149
Hubrost 127f.
Hub- und Senkvorrichtung 152
Hubzahl 175, 186
Hubzylinder 214
Hüllrohr 121
Huminsäure 23, 26, 48
Hydratation 16
Hydrathülle 23
Hydraulikaggregat 133, 135, 169, 194
Hydraulikanlage 209f.
Hydraulikmotor 216
Hydraulikschrank 188, 196
Hydraulikteil 197
Hydromotor 190
Hysterefläche 40

Illit 14f., 17, 27
Informationsverarbeitung, hardwaremäßige 112
Inhomogenität 36, 60, 70, 77f.
Initiator 197
—, fotoelektrischer 168
Innenbohrvorrichtung 214
Innenform 143
Interruptroutine 197
Ionenaustausch 44
Isobutylalkohol 48
Isolator 111
Isolatorenfertigung 94
Isolatoren-Kopiermaschine, automatische, Typ 542 212ff.
Isolatorrohling 212
Isolierkörperrohling 209
Isostatikpreßeinrichtung 196
isostatisch 102

Kachelpresse 82
Kalotte 217
Kaltisostatikanlage 201, 203
Kaltpressen 105
Kanalstein 81
Kanalsteinpresse 82, 173
Kante, abgedrückte 192
Kantenfestigkeit 77, 97, 100
Kantenladung 17, 25
Kaolin 14, 23, 45, 62
—, trockener 193
Kaolinit 14ff.
Kapillardruck 88
Kapillarkraft 24, 26
Kapillarsystem 44
Kapillarwasser 46
Kapsel 196
Kartenhausstruktur 22, 25, 29, 43, 47, 61
Kaßler Braun 48
Kation, austauschfähiges 27, 62
Kationenaustausch 16, 20
Kationenaustauschkapazität 17
Kationenbelegung 19, 35, 61f.
Katode 57, 174
Katodenstempel, durchlässiger 58
Keilriemen 214
Keilriemenantrieb 175
Keilriemenscheibe 170
Keramik, technische 65, 82, 84, 120, 199
Keramikfolie 59
Keramikformgebungsmaschine 124ff.
Keraplast-Dauerform 119
Kern 138f.
Kernguß 51
Kerngußartikel 132
Kernhalter 139f.
Kernhalterbügel 70ff., 139f.
Kettengetriebe 201
Kettentrieb 176
Kieselsäure 23
Kippen 126
Kippkurve 125
Kippstellung 126
Kipptisch 149
Kippvorrichtung 50
Klappzylinder 145
Kleben 193
Klebstoff 93
Kleeblattmesser 65
Kleinteilegießanlage 127
Klinkenrad 176
Kniehebelpresse 102, 174, 176
Kniehebelprinzip 82, 201
Koagulation 44ff.
Koagulationsablauf 46
Koagulationsstruktur 22, 25
Kolbenpresse 64
Kolbenpumpe 138
Kolloid, hydrophiles 23
Kolonnenschnitt 142
Konizität 72, 154
Konsistenz 19ff., 57
Kontaktmanometer 209ff.
Kontrafuß 51
Kontrollmaßnahme 113
Konvergenzanteil 122
Konverterboden 114
Koordinatenabtrieb 215
Kopierdrehautomat 111ff.
Kopierdrehen 111ff.
Kopierdrehmaschine 111ff., 212ff.
Kopierfinger 112
Kopiergeschwindigkeit 215
Kopiergestänge 112
Kopiervorrichtung 213f.
Korn 89
—, abgerundetes 89
—, splittriges 89
Kornband 95
Körnerbewegung 95
Kornform 35, 61
Kornfraktion 89
Korngemisch 95
Korngröße 104
Korngrößenanalyse 35
Korngrößenspektrum 35, 59, 89f.
Körnungsaufbau 27, 88
Körnungsband 45, 61, 94
Körnungsdreistoffdiagramm 88
Körnungsmaßnahme 88
Kornzerkleinerung 101
Korrektursignal 215
Korrosionswirkung 39
Korund 110
Korundschleifscheibe 111
Kraft, *Coulomb*sche 27
Kraftdurchgriff 91
Kraftsensor 159
Kraftübertragung 101
Kraftverlauf 160
Kreuz 158
Kreuzschienenverteiler 137
Kreuzsupport 216
Krisselstruktur 52
Kristallausscheidung 46
Kristallisation 118
Kugelventil 55
Kunststoff-Form 75, 160, 163
Kupplung, elektromagnetische 145, 215
Kupplungsklaue 178
Kurbel 191

Kurve 157, 174f., 178f.
—, feste 201
Kurvengeometrie 159
Kurvengetriebe 156, 158
Kurvenpreßautomat 174
— KPA 5 174ff.
Kurvenpresse 81, 102
Kurvensteuerung 75, 156, 174f., 181f., 201

Ladung, negative 16
Lagenbildung 80
Lagenfehlordnung 15
Lagenriß 192
Lamellenkupplung 152
Längenmeßsystem, inkrementales 199
Langhub-Schließzylinder 207
Längssupport 111
Langstabisolator 106, 111, 212
Lanze 115
Laufeigenschaft 78
Leckfluß 67
lederhart 111, 212, 214
Lederhartförderer 125
Lederharttrockner 125, 127, 160ff., 166, 172
Lederharttrocknung 130ff.
Leistungsverlauf 160
Leitschablone 112
Leitschiene 201
Lichtschranke 167
Lichtschrankensteuerung 166
Lichtstrahl 215
Lignin 26, 48
Litermasse 32, 38, 40, 42, 44, 52
—, optimale 39
Lochplatte 138
Luftblase 50
Lufteinschluß 53, 78, 80, 101
Luftfliese 192
Lunker 53

Magerungsmittel 19
Magnetband 216
Mahlkugel 208f.
Makrotextur 37, 70, 76
Malteserkreuz 157, 160, 172f.
Malteserkreuzgetriebe 158f.
Maltesertrieb 156
Mantel, fliegender 96
Markierung, optische 132
Maschinenständer 168f.
Maschinensteuerung TMS 80 197ff.
Masse 33, 188
—, bildsame 20, 28, 59, 119
—, feuchtplastische 82
—, keramische 13
—, krümelige, feuerfeste 79
—, lederharte 119
—, magere 69
—, oxidkeramische 93, 118
—, pulvrige 20
Masse
—, rieselfähige 83
—, steifplastische 80, 151
—, unplastische 83ff., 114, 117, 176ff.
—, verflüssigungsmittelhaltige 61ff.
—, weichplastische 79
Masseabsenkung 181
Masseaufbereitung 31
Masseband 195
Massebatzen 79, 81, 83, 173
Massebestandteil, bildsamer 62
Masseblatt 57f., 81, 156, 166
Masseblattaufgabe 166
Masseblattfertigung 164
Masseblattfertigungsanlage 165f.
Masseblattumsetzer 166
Massedosierung 84
Masseeigenschaft 14
Masseeinzug 145, 149
Massefüllvorrichtung, volumetrische 195
Massehubel 35, 160
Massekern 49
Massekonsistenz 72
Massescheibe 73, 168f.
Massesilo 176, 195
Masseversatz 19, 40
Massevorratsbehälter 209f.
Maßhaltigkeit 79, 83, 102, 111, 119, 133, 182, 199, 216
Materialflußvektor 66
Matrize 109f., 177, 181f., 188
—, freie 106f.
Matrizenabziehvorrichtung 99f.
Matrizenabzug 178, 180f.
Matrizenabzugpreßverfahren 179
Matrizenabzugverfahren 99
Matrizenform 187
Matrizengestaltung 85
Matrizenmantel 179
Matrizenrahmen 187
—, gefederter 190
Mauken 26
Medium 117
Mehrdraht-Segmentabschneider 142
Mehrfachmatrize 187
Mehrfachmundstück 143
Mehrfachwerkzeug 208
Mehrkammerdruckgefäßtorkretiergerät 116
Mehrlagenbauelement 58
Meißel 217
Membran 202
Membranunterstützung 109
memory effect 118
Messerscheibe, rotierende 166
Meßfühler, kapazitiver 195
Meßsonde 132
Meßsystem, inkrementales 197
Meßverstärker 159f.
Meßwertaufnehmer 159f.
Meßwertwandler 159f.
Metallform 117, 119, 174
Mikrofüller 115
Mikrorechner MC 80 197
Mikrotextur 36f., 60, 70
Mineral, dioktaedrisches 15
Mineral, trioktaedrisches 15
Mischerschnecke 138
Mischerwelle 152ff.
Mischmesser 152
Mischtrog 152ff.
mixed layer 15
Modifikation, polymorphe 15
Montmorillonit 14f., 17, 25, 27
Motor, thyristorgeregelter 151
Muffenrillierung 133
Mundstück 64ff., 71f., 113, 138ff., 143, 154, 160
Mundstückaustritt 139
Mundstückkonizität 139, 141
Mundstücklänge 139
Mundstückplatte 140
Mundstückquerschnitt 139
Mündung 207

Nabe 66
Nabendurchmesser 139
Nacheinanderdruck 95, 100f.
Nachpreßdruck 176
Nachpresse 173ff.
Nachpressen 63, 81, 120
Nachpreßzylinder 143
Nachsaugventil 194
Nachsteifen 48
Nadelfallversuch 34
Naht 50
Nakrit 15
Naßmatrizenverfahren 105f.
Naßpresse 173ff.
Naßpressen 63, 82f.
Naßtorkretieren 115
Natriumaluminat 48
Natriumion 22
Natriumtripolyphosphat 47
NC-Steuerung 153, 216
NC-Steuerungssystem 112
Neigungswinkel 155f.
Nettoladung 18
Neutronenmethode 31
Niederdruck 188
Niederdrucköl 196
Niederdruckregelpumpe 137
Niederhalter 179
Nitrid 109, 120
Nontronit 14
Notfußsteg 51
Nutkurve 158

Oberdruck 95
Oberdruckverpressung 96, 99
Oberfläche, spezifische 19, 138
Oberflächengüte 119
Oberflächenladung 16
Oberflächenqualität 75, 107

Oberflächenspannung 26, 53
Oberform 83, 172f.
Oberpreßrolle 201
Oberpressung 179, 181
—, hydraulisch verriegelte 182
Oberstempel 83, 109, 177f., 184, 186, 194ff., 210
—, umlaufender 199
Oberstempeldruck 91
Oberstempeleintritt 179
Oberstempelhub 175
Oberstempelputzvorrichtung 196
Oberstempeltraverse 187
Obertraverse 182
Oberwerkzeug 207f.
—, geteiltes 179
Ofenkachel 81
OH^--Ionenkonzentration 22
Oktaederschicht 15
Ölbehälter 194f.
Öldruckpumpe 184
Olein 91
Ölfilter 188
Ölkreislauf 209
Ölsäure 48
Ölseparator 209
Operationsspeicher 197
Orientierung 36, 62, 76, 118f.
Orientierungsinhomogenität 52
Osmose-Kaolin 23
Oxid 109
Oxidkeramik 117, 120

Packungsdichte 27, 88f., 102
Palette 127, 129, 151
Palettentransport 164
Palettentransporteinrichtung 149f., 166
Parallelogramm 111
Paralleltextur 61
Partikelkoagulation 127
Paßschraube 176
Pelletherstellung 151
Pelletieren 80
Penetrationsgrad 34
Penetrometer 34
Penetrometerwert 33
Peptisator 23
Permeabilität 44
Photoskop 112
Photozelle 112
*p*H-Wert 22, 25
Plastifikator 24
Plastifizierung 149
Plastifizierungsmittel 64
Plastiks 80, 114
Plastizität 23
Plastizitätsmessung 33
Platte 176
—, ovale 51
pneumatisch 175
Pocke 53
Polierbrett 114
Polymer 118
Polysäure 47
Polyurethan 74
Polyvinylsulfonat 47
Porenstruktur 133
Porensystem 43
Porenvolumen 45
Porosität 88
Porzellangranulat 175
Porzellanmasse 41, 62, 76, 94, 104, 142
Porzellanschlicker 49
Positionierantrieb 167
Potential 17ff.
—, ζ- 56
Potentialverlauf 17, 20
Potentiometer 214
Präzisionsgetriebe 215
Preßautomat, hydraulischer, TPA-H 183f.
Preßautomat, isostatischer, Typ PI 208ff.
Preßdichte 84
Preßdruck 27, 82, 84ff., 101, 103, 138, 186, 198
—, isostatischer 196, 207
Preßdruckabschaltung, druckabhängige 198f.
Preßdruckabschaltung, wegeabhängige 198f.
Presse
—, hydraulische 101, 176, 184ff.
—, isostatische 194, 205
—, liegende 64
—, mechanische 102
—, stehende 64
Pressen 83ff.
—, doppelseitiges 110
—, dreiachsiges 105, 107
—, heißisostatisches 110
—, isostatisches 84f., 93f., 102ff., 111
—, liegendes 95
—, quasiisostatisches 105, 107
—, zweiachsiges 105, 107
Pressengehäuse 145
Pressengestell 194, 208
Pressentisch 143, 194ff.
Preßfläche 95
Preßflügel 71
Preßflüssigkeit 102, 109
Preßform 198
Preßgeschwindigkeit 198
Preßgleichung 87, 186
Preßgranulat 109, 207
Preßgranulieren 80f.
Preßhilfsmittel 85, 90
Preßkolben 194
Preßkopf 65ff., 72, 113, 139, 154f.
Preßkopfaustritt 139
Preßkopfdruck 67
Preßkopfeintritt 139
Preßkopfströmung 72
Preßkraft 86, 175, 186
Preßkraftanzeige 182
Preßkurve 95, 98, 100, 176, 184
Preßling 103, 108f.
Preßluftstampfer 80, 114
Preßmasse 26, 186
Preßnadel 210ff.
Preßneutrale 87, 97, 100ff., 179
Preßposition 202
Preßriß 191
Preßschema 209
Preßschnecke 66, 138f., 145, 151, 154
Preßstellung 179, 181, 183, 188
Preßstempel 84, 184
Preßtextur 85
Preßtisch 101, 205
Preßtraverse 187
Preßvorgang 84, 95ff., 184ff.
Preßweg 86, 179
Preßwerkzeug 82, 109, 201
Preßwerkzeughalter 201
Preßzonenverlagerung 198
Preßzyklus 176f., 188
Preßzylinder 64, 66, 133, 137, 142, 187f., 194f., 198, 205
—, einteiliger 145
Prinzip, fotoelektrisches 113
Produktivität 83
Profilschleifen 111
Profilstrang 65
Profilwelle 138
Programm 197
Programmzeitgeber 129
Proportionalventil 137, 197, 207
Proportionalventiltechnik 198
Prüfsiebung 35
pseudohexagonal 15
pseudoplastisch 41, 60
Pseudoplastizität 30
Pufferband 160f., 166
Pulver 27, 110, 117, 121
—, rieselfähiges 101
Pulvermischung 120
Putzbürste 190f.
Putzen 79, 166
Putzmaschine 163, 206, 208
Putzmesser 176
Putztisch 176
Putzvorrichtung 202, 204

Quarz 19, 23
Quarzkorn 54
Quebracho-Extrakt 48
Quellvermögen 25, 34
Querhaupt 176, 178
Quermischung 152
Querstreifen 189
Quersupport 111f.
Quetschen 73
Quetschmesser 169
Quetschschablone 72
Quetschstern 168
Quintusprinzip 108

Radialkolbenpumpe 209ff.

Rakelauftrag 58
Rampengenerator 197
RAM-Presse, hydraulische 173
RAM-Pressen 82
Rand, festonierter 163, 166, 205
Randplatz 16
Randzone 97
Randzonenverdichtung 99, 178
Raumerfüllung 36
Reaktionsdruck 58
Recheneinheit, zentrale 197
Rechnersteuerung 167
Rechteckferritkern 199
Regelgetriebe 214
Regelschema 142f.
Reibkraft 163
Reibung 91, 178
—, innere 84
Reibungsbeiwert 87
Reibungskraft 18, 198
Reibungsverlust 209
Reibungswiderstand 66
Reindichte 104
Relativgeschwindigkeit 66
Relaxationskraft 18
Relief 205
Reparaturstelle 115
Reparaturtechnologie 115
Rest-Pseudoplastizität 42
Restschlicker 124, 126, 130
Restschlickerentleerungsstation 132f.
Revolverpresse 63, 81, 102, 172f.
Rezipient 106f., 203
Rheologie 28
Rheopexie 30
Richtungsgefüge 36
Riegelbildung 52
Rieselfähigkeit 27, 93
Ringspalt 154
Riß 54, 60, 78, 112
Rißanfälligkeit 19
Rißbildung 60, 77, 104, 118, 123
Rißbildungsneigung 61
Ritzel 215
Rohbruchfestigkeit 103
Rohdichte 91ff., 103, 211f.
Rohling 50
—, vorgeformter 120
Rohrbündel-Wärmeübertrager 188
Rohrpresse 82
Rohschamotte 89
Rohstoff, plastischer 13f., 192
Rohstoff, unplastischer 13
Rolle 158, 191
Rollenbahn 166
Rollenmeißel 217
Roller 169, 171
Rolleranlage 155ff.
Rollerformgebung 35, 61, 72ff., 155ff.
Rollerkopf 73ff., 155ff., 163, 168f., 172
Rollerkopfbeheizung 74f.
Rollerkopftemperatur 78, 172
Rollermaschine 155ff.
— Fig. 517.03 159
Rollerwerkzeug 72ff., 155f.
rostfrei 145, 149
Rotationsfüller 204
Rotationspumpe 138
Rotationsviskosimeter 31ff., 40, 60f.
RRS-Körnungsnetz 35
Rubinkorundschleifscheibe 212
Rückdeformation 118
Rückdehnung 94, 103f., 192, 194, 212
Rückholkurve 176
Rückläufer 39, 42f.
Rücklaufschlicker 46
Rücksprungeffekt 104, 109
Rückstau 138
Rückstauwächter 154
Rückstellstation 132f.
Rücktrocknung 163
Rückverformung 26
Rückzug 156, 169
Rückzugsvorrichtung 163, 169
Rundtisch 201
Rundführung, wälzgelagerte 169
Rundlaufpresse 201
Rutschkupplung 175
Rütteldichte 94f., 105
Rüttelhub 176
Rütteln 114
Rüttelschlagverfahren 115
Rütteltisch 115
Rüttler 115

Sanitärkeramik 83, 113
Saponit 14
Saugdruck 45
—, kapillarer 55
Säule 194f.
Schablone 111f., 116
—, gezeichnete 112
—, rotierende 202
Schablonenformung 155
Schablonier vorrichtung 196
Schale 156
Schalenkupplung 154
Schalter, induktiver 192
Schaltgetriebe 145
Schaltperiode 158
Schaltung, sequentielle 152
Schamottemasse 79
Schaukeltrockner 191
Scheibenpresse 64
Scheibenwalze 64
Scheibenzerstäuber 94
Schema, kinematisches 174ff.
Scherben 39, 47
Scherbenablösung 57
Scherbenauftreibung 53
Scherbenbildung 39, 42ff., 127
Scherbenbildungsgeschwindigkeit 38f., 45f., 49, 55f.
Scherbenbildungsprozeß 43ff.
Scherbenbildungszeit 55, 126, 129, 132, 137
Scherbendicke 32
Scherbenprofil 74f., 155f.
Scherbenschnitt 73f.
Scherbenstärke 44, 124, 126
Scherbenwachstum 44
Scherfestigkeit 26
Schergeschwindigkeitsgefälle 28, 36, 61
Scherrate 28f., 41, 75
Scherspannung 24, 28f., 60
Schicht, äußere 16
Schicht, innere 16
Schichtenströmung 60
Schichtpaket 14
Schichtsilicat 14
Schiebekeil 132
Schieber 191, 207
Schieferbildung 94
Schirm 112
Schlaghebelpresse 81, 173
Schlammspritzen 115
Schleichgang 169
Schleife 78
Schleifen 212
Schleifenbildung 78
Schleppwirkung 67
Schleuderkopf 116
Schlicker 20, 28f., 31, 45, 47, 121, 127
—, kalter 48
—, thixotroper 42
—, unterverflüssigter 29
Schlickerdruck 57, 133, 137
Schlickerförderaggregat 135
Schlickergießen 38
Schlickerheizung 135, 137
Schlickerkreislauf, geschlossener 133
Schlickerparameter 38
Schlickerpumpe 137
Schlickertemperatur 49, 127
Schlickerwasser 45
Schlickerzuführungskanal 53
Schlierenbildung 52
Schließgeschwindigkeit 133
Schließhebel 132
Schließkraft 133, 208
Schlinge, profilierte 112
Schlitten 214f.
Schlitz 158
Schlitzplatte 65f., 138, 162
Schlupf 66
Schlußflügel 72
Schmelzsicherung 107
Schmierwirkung 92
Schnecke 66, 138, 145, 154
Schneckenbelag 154
Schneckendrehzahl 154
Schneckenflügel 66
Schneckengetriebe 175f., 182
Schneckenpresse 64f., 138ff.

Schneckenradwelle 201
Schneckentextur 139
Schneckenwelle 70, 113
Schneiddraht 141f.
Schneideinrichtung 149
Schneidkeramik 111, 217
Schneidscheibe 138
Schneidschlitten 151
Schneidwerkzeug 113, 163
Schnellhub 163
Schnellmischer 149f.
Schnittgeschwindigkeit 217
Schnittlänge 151
Schnittstelle, Ein- und Ausgabe- 197
Schnitt-Textur 70f., 139
Schnittwerkzeug 214
Schnitzelmesser 138, 154
Schockwelle 122
Schockwellenführung 122
Schonrand 73
Schonung 49, 54
Schraubkappe 176
Schrittgetriebe 159
Schüttdichte 94f., 104f., 209
Schutzgas 110
Schutzkolloid 23, 47f.
Schwammband 163
Schwellverhalten 118
Schwenkroller 155, 159
Schwindung 54, 60, 62
—, anisotrope 77
Schwindungsdifferenz 76
Schwungscheibe 177
Sedimentation 29, 50
Sedimentationsanalyse 35
Seitenschieber 174f.
semiisostatisch 107
Sensor 159
Serviceprogrammpaket 197
Servoventil 216
Setzmaschine 80
SiC-Form 120
Sicherungspatrone 176
Sicherungssockel 176
Siebensegmentanzeige 197
Siebplatte 149, 151
Signallaufzeit 215
Signalverarbeitung, hardwareseitige 215
Siliciumcarbid 110
Siliciumnitrid 110
Silikamasse 79
Silo 191
sin/cos-Funktionsgeber 215
Sintermetall 173
Slingern 114, 116
Smectit 15
Soda 12, 39, 47, 52, 62
Sodalösung 46
software 197
Sol 29
Sol/Gel-Umwandlung 45
Solvathülle 16
Sorptionskapazität 17
Spaltbarkeit 17
Spannklaue 214
Spannungsfeld 60
Spantiefe 217
Spanwinkel 217
Speicher 149f.
Speisewalze 151
Speisezone 154
Sperre 188, 190, 196
Sperrklotz 187, 190
Sperrschieberpumpe 197f.
Sperrsegment 158
Spezialgips 83
Spindel 72ff., 163, 169ff., 178
Spindelachse 155
Spindelaufnahme 78, 156, 163
Spindellagerung 170
Spindelpresse 102, 176
Spindelvakuum 78
Spiralfeder 97ff.
Spiralleiste 154
Spiralstempelpresse 173
Spitzenrillierung 138
Spitzkopfschnecke 154
Spreizkeilriemen 159
Spreizscheibentrieb 182
Sprengstoff 121ff.
Spritdüse 115
Spritzgemenge 115
Spritzgießen 117, 119
Spritzgießmasse 118
Spritzgießmedium 117
Spritzling 117
Spritzloch 81
Spritzmasse 115
Spritzprägen 119
Spritzzylinder 117
Sprühgranulat 27, 80, 93ff., 182, 209
Sprühkorn 93, 101, 205
Sprühkornaufbereitung 61
Sprühkorngröße 94f.
Sprühkornmasse 92
Sprühschlicker 61, 63
Sprühtrockner 61
Sprühtrocknung 93
Stabilität 17
— des Schlickers 21
Stabplatte 138, 149
Stahlkern 109
Stahlschablone 155f.
Stampfen 63, 114
Stampflage 80
Ständer 176, 187
Standguß 124
Stanze 82
Stanzen 57, 81
Stapeldrehtisch 206
Steatitgranulat 175
Steatitmasse 83
Steg 148
—, gedrallter 138
—, gerader 138
steifplastisch 65
Steifverpressung 64, 69f., 138
Steigung 139
Steindickenmessung 199
Steinzeugmasse 83
Steinzeugpresse, isostatische 109
Steinzeugrohr 70
Stellgetriebemotor 151
Stempel 82
—, selbständiger 87
Stempelpressen 110
Sternbildung 78
Steuereinheit, hydraulische 169
Steuerkombination 197
Steuerkopf 113
Steuerkreis 209
Steuerung 155, 160
— des Pressentisches 198
— des Preßvorganges 198
—, elektrische 161, 169
—, elektrohydraulische 197
—, elektronisch/hydraulische 182
—, fotoelektrische, PH 18 213, 215
—, freiprogrammierbare 197
—, hydraulische 75, 188
—, numerische 151
Steuerwelle 176
S-Textur 37, 60, 70f., 113, 139
Stopfenziehvorrichtung 125
Stößel 121, 158, 174f.
Strangaufweitung 118
Strangaustrittsrichtung 151
Strangformgebung 63ff.
Stranggeschwindigkeit 142ff.
Strangpresse 35, 63, 137ff.
Strangpressen 61, 63ff.
Strangquerschnitt 143
Strangriß 71
Strangvorschub 151
Strangvortrieb 139
Streichmaschine 79
Streichverfahren 79
Stromaufnahmemessung 35
Strömungsgeschwindigkeit 54, 71f.
Strömungsverhältnis 60
Struktur 36
—, gehämmerte 52
Strukturviskosität 29, 42
Strunk 112
Stufenpreßzylinder 138
Stützer 111, 212
Substrat 58
Support 214
Supportbewegung 112
Suspension 17, 31, 43
Suspensionsflüssigkeit 56
System, kolloides 29

Taktzeit 107
Talkum 91
Tangentialgeschwindigkeit 74f.
Teilchenebene 36

Teilchengestalt, anisometrische 16
Teilchengröße 16
Teller 73, 156
Tellerfertigungsanlage isomat PIT 250 202ff.
Tellerinnenfläche, sprossige 78
Tellerproduktionsanlage 156f.
Temperatur 48, 75, 109
Tetraederschicht 15
Textur 19, 36, 52, 60, 70ff., 76f., 113, 115, 119, 138
Texturbildung 68
Texturfreiheit 113
Texturgrundtyp 36
Texturoptimierung 145
Texturspannung 61
Texturzahl 68ff.
Texturzerstörer 73, 139
Thermoplast 117f.
Thixotropie 30, 32, 40, 42f., 49, 52
Thixotropieeffekt 114
Thixotropiekoeffizient 32
Thixotropiezahl 32, 49
Thyristorregelsatz 144
Timerkombination 144
Titancarbidform 110
Ton 14
—, trockener 193
Tonerde 149
Tonmineral 14ff., 36, 54
Tonnudel 81
Tonpumpe 70
Tonverflüssigung 20
Topfkurve 158, 160
Torgestell 209f.
Torkretieren 114f.
Torsionshysterese 34
Trägerband 58
Trägermaterial 117
Tränkungskoeffizient 45
Transportband 130
Transportkette 123, 126, 160
Transportpalette 129
Traverse 194f.
Treiber 158
Treiberbolzen 157
Treiberrolle 158
Trennautomatik 149ff.
Trennmittel 174
Trenntechnologie 51
Triäthanolamin 48
Trockenbiegefestigkeit 62f.
Trockenbruchfestigkeit 27, 45, 48, 54, 59, 61
Trockenmatrizenverfahren 105ff.
Trockenpreßautomat 179
Trockenpresse, isostatische, isomat 202ff.
Trockenpressen 83ff., 176ff.
—, einseitig isostatisches 202
Trockenpreßmasse 84, 95, 199
Trockenschwindung 19, 52, 216
Trockentorkretieren 115
Trockner 149f.
Trocknungsverlauf 173
Trocknungszeit 38
Trog 145, 148
Tropfnase 112
Turbulenz 119

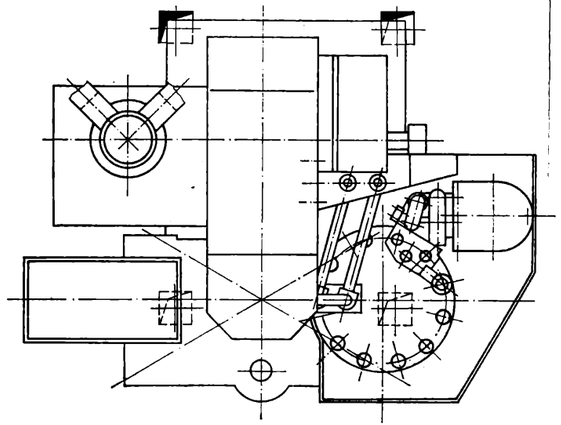
Überdruckprinzip 55
Überdruckventil 97f.
Überformen 73, 155, 164, 166
Überschußschlicker 127
Überverdichtung 123
Überverflüssigung 41
U-Kern 178
Ultraschallgerät 114
Ultraschallviskosimeter 31
Umdrehungsgeschwindigkeit 159
Umlaufschnitt 141f.
Umsetzer 163, 176
Umsetzvorrichtung 206
Umsteuerschieber 209
Unterdruck 95
Unterdruckverpressung 98
Unterform 172f.
Untergriffigkeit 112
Unterpreßrolle 201
Unterpressung 179
Unterschneidung 82
Unterstempel 83, 177f., 184, 186, 194f., 205
—, umlaufender 199
Unterstempelanhebung 196
Unterstempeldruck 91
Unterstempelfall 189
Unterstempelplatte 187
Unterverdichtung 122
Unterverflüssigung 41, 46
Unterwerkzeug 202, 204, 207
U-Rohr-Manometer 113

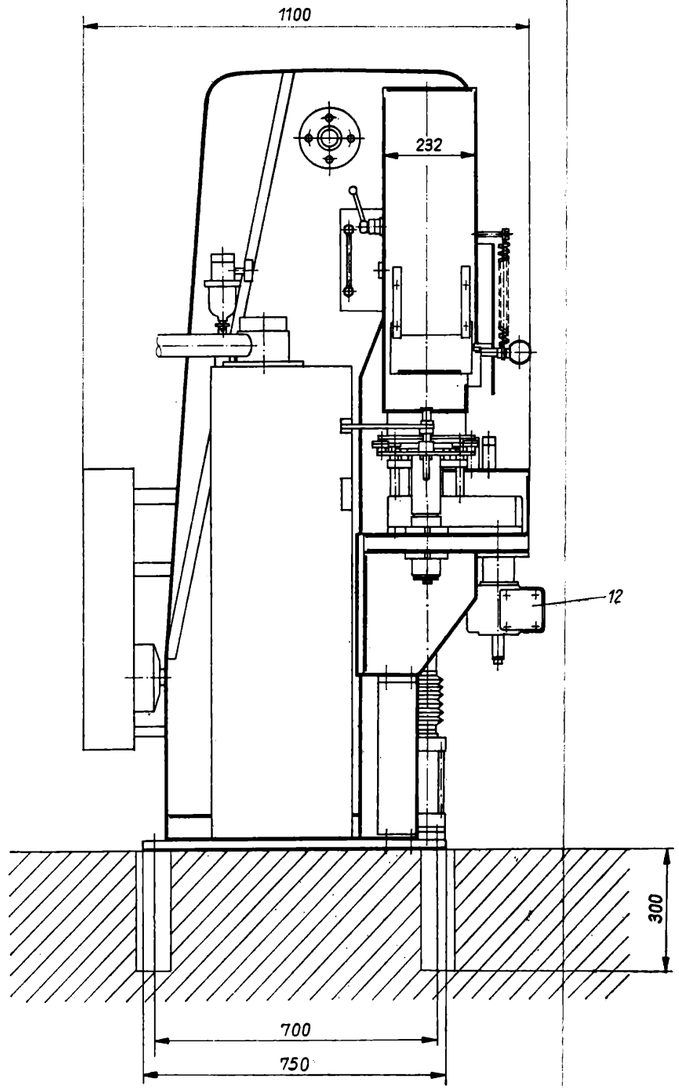
Vakumat 64, 68, 70, 138
Vakuum 113, 127, 156, 163, 173, 207
Vakuumaggregat 64, 68, 138f., 142
— »COMPACTA«, Typ PZVA 60a/56 152ff.
Vakuumdosierpresse 156
Vakuumerzeugung 65
Vakuumgießanlage 53
Vakuumkammer 64ff., 69, 138 145, 149, 152, 154, 160, 162
Vakuumpresse 160ff., 165f.
— PVP S 10 149ff.
— PVP 75 142ff.
Vakuumpumpe 137, 165
Vakuumsauger 119
Vakuumschneckenpresse 68
Vakuumstrangpresse 64, 73
Vakuumventil 156
Ventilsteuerung 149
Verarbeitbarkeit 59
Verarbeitungsintervall 35
Verbundwerkstoff 120
Verdichten 121
—, direktes 121
—, indirektes 121
Verdichtung 66, 85, 87, 90, 96f.
—, homogene 85
—, isostatische 102, 201, 207
Verdichtungsfunktion 66f.
Verdichtungshomogenität 182
Verdichtungsverhalten 27
Verdichtungsweg 96, 101
Verdichtungswelle 122
Verdünnen 42
Vereinzelung 151
Verfahren, pulvermetallurgisches 120
Verflüssigung 19, 25, 29, 39, 53
Verflüssigungsgrad 41, 46
Verflüssigungskurve 22, 39f.
Verflüssigungsmittel 20, 22, 39f., 47, 61
—, organisches 48
Verflüssigungsmittelzusatz 45
Verformung 24
—, bleibende 34
—, elastische 34
—, ungleichmäßige 60
Verformungseigenschaft 40
Verformungsgeschwindigkeit 60, 119
Verformungsgrad 185
Verformungsverhalten 34
Vergießen 114
Verhältnis, sterisches 15
Verkratzen 50
Verpressung 95
—, doppelseitige 95
—, einseitige 95ff.
Verputzen 50
Verputzmaschine 161
Versatz 19
Verschleißbelag 154
Verschleißseite 71
Verschneiden 51
Verschwammen 50, 54, 79
Verschwammvorrichtung 204
Versenk 182
Verspannung 77
Verstärkerbaugruppe 197
Versteifungsvorgang 43
Verteilungsgefüge 36
Vertikalhub 169
Vertikalpresse 65
Vertikalschlitten 168f., 214
Vertikalsupport 112
Verziehen 60
Vibration 108f.
Vibrationspressen 115
Vibrationsverdichten 114
Viersäulenoberkolbenpresse PYH 500 194ff.
Viersäulenpresse PHD 800 184f.
Vierschichtmineral 15
Vinamold-Verfahren 106f.

Viskosität 14, 24, 28f., 31, 33, 49, 61, 117
—, plastische 29f., 34, 40f., 52
Viskositätskoeffizient 28
Viskositätskurve 41
Vollendungsarbeit 78
Vollguß 51f.
Vollhubel 65, 142
Vollschablone 73
Vordosiereinrichtung 176
Vordosierung 210
Vordrehen 214
Vordruck 177
Vorfederung 181
Vorformling, verglühter 111
Vorfüllung 181, 201
Vorpreßdruck 176
Vorpressen 96, 173, 185f., 198
Vorquetschen 74
Vorroller 73
Vorschruppen 216
Vorschruppmeißel 217
Vorschubgeschwindigkeit 112f.
Vorverdichten 96, 100, 108f., 184ff.
Vorwahlschalter 197
Vorzugsorientierung 59, 77

Wachs 117f.
Walzenpresse 117f.
Wanderungsgeschwindigkeit, elektrophoretische 18
Wandfliesenmasse 86
Wannenstein 114
Wärme 75, 117
Warmluft 127
Warmpressen 105
Wasser 42, 48, 91, 115
Wasserentzug 44
Wassergehalt 20, 39, 42, 63, 92
—, optimaler 39
Wasserglas 22f., 39, 47, 52, 62
Wasserkonzentration 44
Wasserstoffbindung 15
Wasserstoffbrücke 17
Wasserstoffbrückenbindung 25
Wechsellagerung 15
Wechselwirkungsenergie 21, 24
Wegeventil 129, 197
Wegmeßsystem, inkrementales 167
Weichverpressung 64, 69f., 138, 152
Weidezaunisolator 176
Weißabdrehen 216
Weißformgebungsmaschine 113
Weißkopierdrehmaschine SO-1-NC 216f.
weißtrocken 111
Weißtrockner 124ff., 129, 161, 164, 173
Weißtrocknung 50, 63
Wendevorrichtung 127ff.
Werkstoff, oxidkeramischer 149
Werkzeug, geteiltes 182
Werkzeugoberteil 211
Werkzeugrahmen 194ff., 198
Werkzeugunterteil 208, 210f.
Werkzeugwechsel 208
Widerstandsbeiwert 139
Widerstandstrocknung, elektrische 111
Wurfschaufel, umlaufende 116
Wurfschleudern 116
Wurzel/Zeit-Gesetz 44

Zahnradpumpe 209
Zahnstange 214
Zeichnung 112
Zeichnungsvorlage 215
Zeitabhängigkeit 42
Zellraddosierapparat 176
Zentrierband 165f.
Zentrierring 170
Zerkleinerung 89
Zerstäubungstrockner 205
Ziegel 70, 79, 173
Ziegelindustrie 68, 201
Ziegelton 19
Ziehen 63
Ziehfeuchte 149
Zuführschnecke 138, 145, 149
Zugfestigkeit 25
Zünder 121
Zündkerze 107, 111
Zündkerzenisolator 208, 212
Zündung 122
Zusammensetzung 45
Zustand
—, bildsamer 24ff.
—, flüssiger 20ff.
—, lederharter 50, 79
—, trockener 26ff.
Zuteilband 195f.
Zwangslauf 158
Zweisäulenpresse, liegende, hydraulische 133, 135
Zweischichtmineral 15
Zweischichtsilicat 15
Zweischneckenpresse 65, 138, 142
Zweiseitendruck 95, 100f.
Zweiwege-Einbauventil 198
Zweiwellenmischer 138
Zwickerschnitt 141f.
Zwillingspresse 82
Zwischenschichtplatz 16
Zylinder 148
Zylinderauskleidung 154
Zylinderkurvengetriebe 158





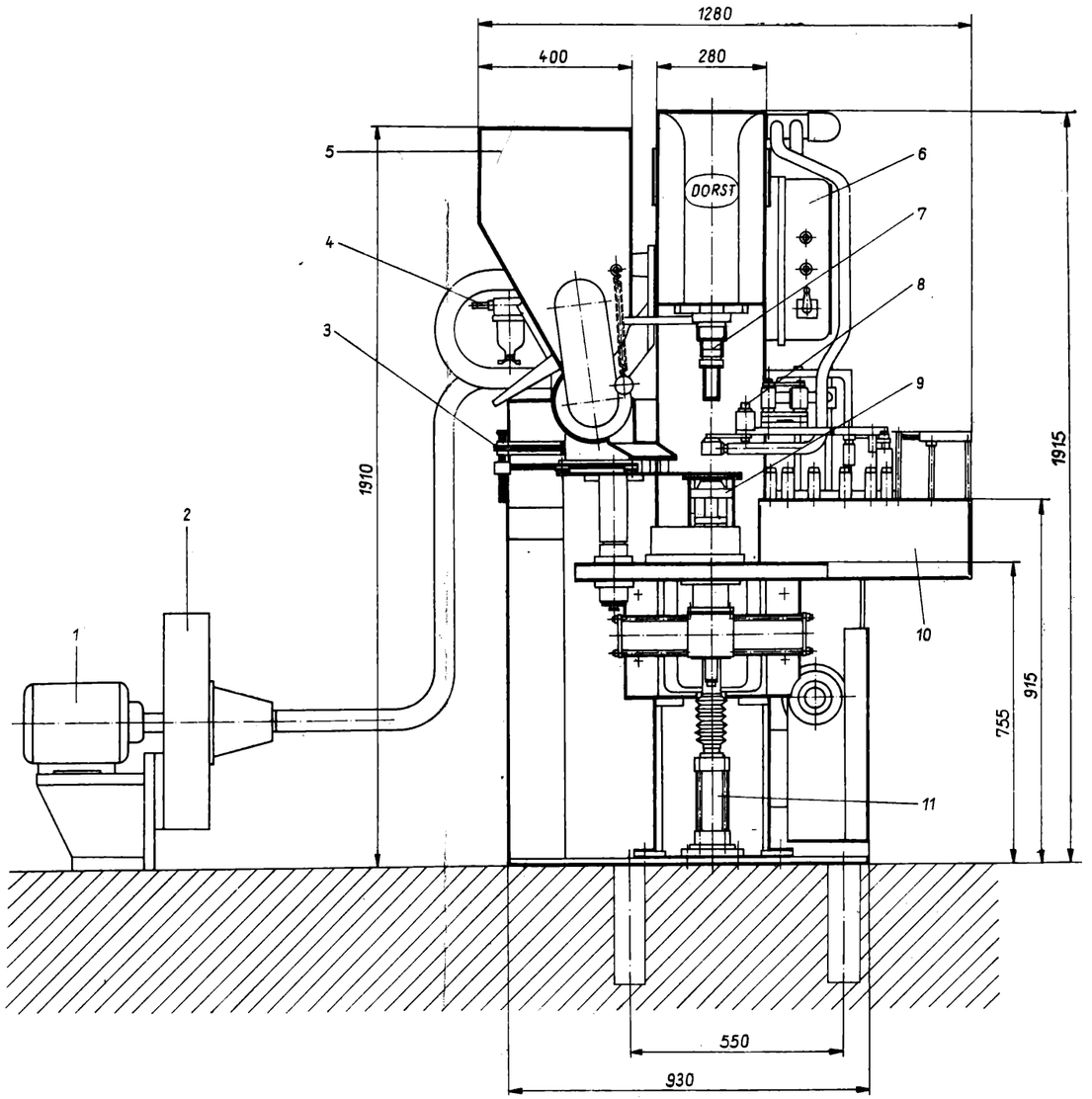


Bild 4.47. Kurvenpreßautomat KPA 5 [218]

1 Motor (N = 2,2 kW, n = 2880 min^{-1}), *2* Ventilator (3 kPa/17 m^3), *3* Füllschieber, *4* Preßluftanschluß, *5* Füllsilo (Inhalt etwa 40 l), *6* Schaltkasten, *7* Werkzeugoberteil, *8* Abnahmevorrichtung (Vakuumabnehmer), *9* Werkzeugunterteil, *10* Putztisch, *11* Ausstoßzylinder, *12* Drehvorrichtung

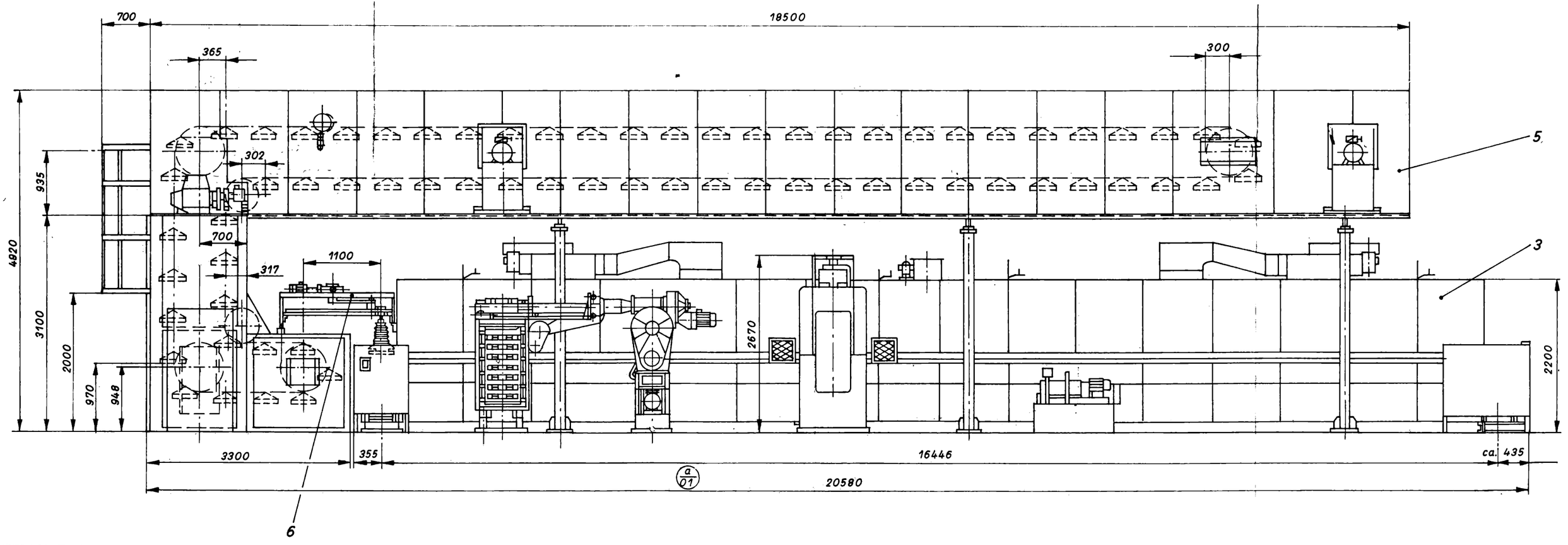
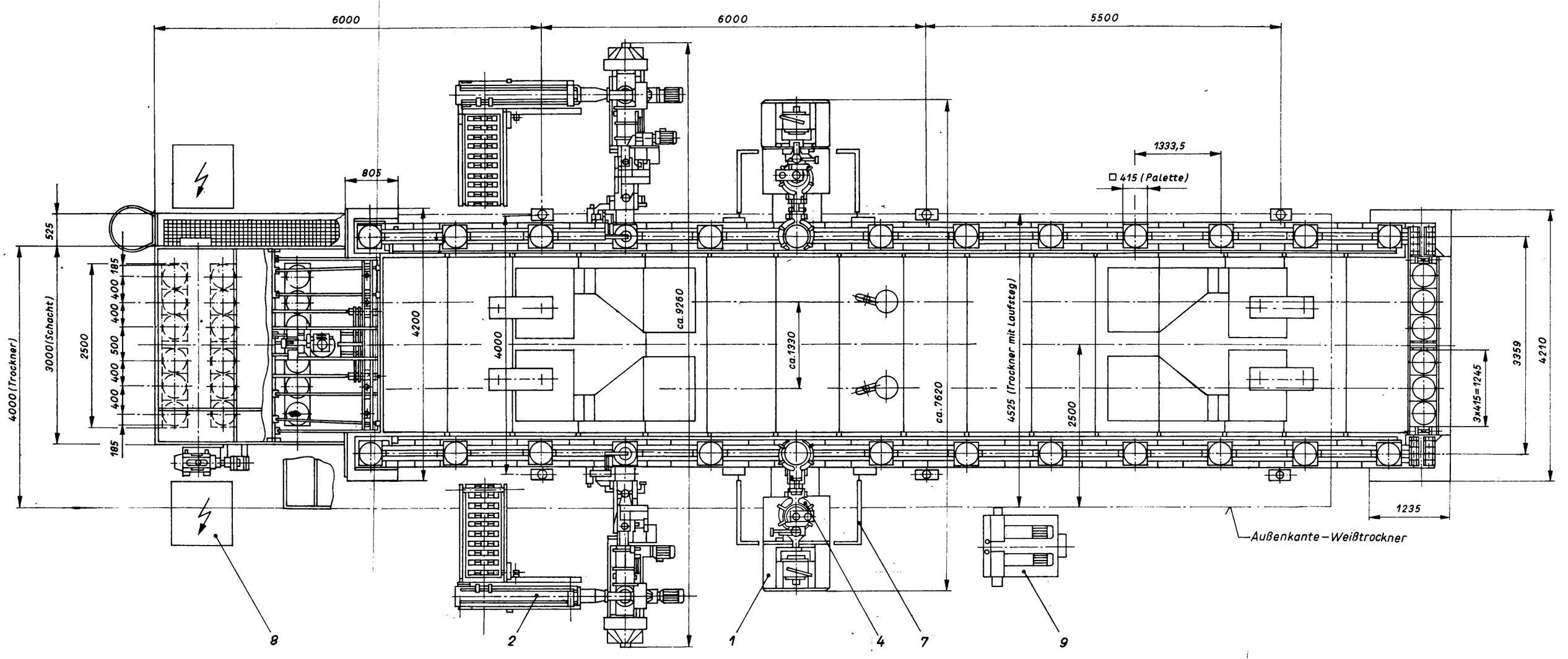


Bild 4.38. Fertigungslinie zur Geschirrherstellung im Überformverfahren FF 1 [215]

1 Drehmaschine DG 1, *2* Masseblattfertigung, *3* Lederharttrockner mit Palettentransportsystem, *4* Formenumsetzer, *5* Weißtrockner, *6* Umsetzer Lederhart-/Weißtrockner, *7* Schutzgitter, *8* elektrische Einrichtung, *9* zentrale Vakuumerzeugung


6000
6000
5500
805
1333,5
□ 415 (Palette)
525
185
400
400
500
400
400
185
4000 (Trockner)
3000 (Schacht)
2500
4200
4000
ca. 9260
ca. 1330
ca. 7620
4525 (Trockner mit Laufsteg)
2500
3359
4210
3x415=1245
1235
Außenkante – Weißtrockner
8
2
1
4
7
9